

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**ANALÝZA SIGNÁLŮ ZE SENZORICKÝCH SYSTÉMŮ**

SIGNAL PROCESSING IN FIBER OPTIC SENSING SYSTEMS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Vít Gardáš**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Münster, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Vít Gardáš

**ID:** 164269

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Analýza signálů ze senzorických systémů**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je teoretický rozbor problematiky detekce a optimalizace výstupů z vláknových senzorických systémů se zaměřením na filtraci zašumělých signálů, korelaci, průměrování, apod. Na základě teoretického rozboru bude provedena základní filtrace naměřených signálů ze senzorických systémů. Výsledkem práce bude grafické uživatelské rozhraní (GUI) pro zobrazení signálů s implementací jednotlivých metod pro zvýšení kvality signálu.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] MCCLELLAN, James H., Ronald W. SCHAFER a M. A. YODER. DSP first. Second edition. ISBN 0136019250.

**Termín zadání:** 18.6.2018

**Termín odevzdání:** 15.8.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá senzorickými systémy a analýzou jejich signálů. V první části byl proveden teoretický rozbor jednotlivých senzorických systémů. Následně byly určeny vhodné filtry pro zpracování jejich signálů. A v poslední části byly analyzovány reálné náměry.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

DAS, DTS, FBG, OTDR, Senzorické systémy, SOFO, Zpracování digitální signálů.

## **ABSTRACT**

This master's thesis is focused on sensory systems and analysis of such signals. In the first part, a theoretical analysis of each sensory system is conducted. Followingly, appropriate filters were used to process these signals. The last part of this thesis deals with the analysis of measured data.

## **KEYWORDS**

DAS, Digital signal processing, DTS, FBG, OTDR, Sensory systems, SOFO.

GARDÁŠ, Vít. *Analýza signálů ze senzorických systémů*. Brno, 2018, 52 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza signálů ze senzorických systémů“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petrovi Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Úvod</b>  | <b>10</b> |
| <b>1 Způsoby měření</b>                                  | <b>11</b> |
| 1.1 Rozdělení optovláknových senzorů . . . . .           | 11        |
| 1.1.1 Bodové senzory teploty . . . . .                   | 11        |
| 1.1.2 FBG senzory . . . . .                              | 12        |
| 1.1.3 SOFO senzory . . . . .                             | 14        |
| 1.1.4 DTS-Ramanovy a Brillouinovy OTDR senzory . . . . . | 16        |
| 1.1.5 DVS senzory . . . . .                              | 18        |
| 1.1.6 DAS senzory . . . . .                              | 19        |
| <b>2 Zpracování signálů</b>                              | <b>23</b> |
| 2.1 Impulzní charakteristika . . . . .                   | 23        |
| 2.2 Plovoucí průměr . . . . .                            | 25        |
| 2.3 Kmitočtové filtry . . . . .                          | 27        |
| 2.4 Korelace . . . . .                                   | 30        |
| 2.4.1 Výpočet korelace analogových signálů . . . . .     | 31        |
| 2.4.2 Výpočet korelace diskretních signálů . . . . .     | 32        |
| <b>3 Zpracování naměřených signálů</b>                   | <b>33</b> |
| 3.1 Použitý DAS systém . . . . .                         | 33        |
| 3.2 Náměry - trasa Brno . . . . .                        | 33        |
| 3.2.1 Úprava původního signálu . . . . .                 | 34        |
| 3.2.2 Impulzní charakteristika . . . . .                 | 35        |
| 3.2.3 Plovoucí průměr . . . . .                          | 37        |
| 3.2.4 Pásmová propust . . . . .                          | 38        |
| 3.2.5 Korelace . . . . .                                 | 39        |
| 3.3 Náměry - trasa Praha . . . . .                       | 40        |
| 3.3.1 Úprava původního signálu . . . . .                 | 40        |
| 3.3.2 Impulzní charakteristika . . . . .                 | 42        |
| 3.3.3 Plovoucí průměr . . . . .                          | 44        |
| 3.3.4 Pásmová propust . . . . .                          | 45        |
| 3.3.5 Korelace . . . . .                                 | 46        |
| 3.4 Grafické uživatelské rozhraní . . . . .              | 48        |
| <b>4 Závěr</b>   | <b>49</b> |
| <b>Literatura</b>  | <b>50</b> |





# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Bodový senzor teploty. . . . .                                 | 12 |
| 1.2  | Bodový senzor - využití absorpčního krystalu GaAs [3]. . . . . | 12 |
| 1.3  | Struktura FBG mřížky. . . . .                                  | 13 |
| 1.4  | Vstupní signál. . . . .  | 13 |
| 1.5  | Průchozí signál. . . . .                                       | 13 |
| 1.6  | Odražený signál. . . . .                                       | 13 |
| 1.7  | SOFO systém pro statická měření [6]. . . . .                   | 15 |
| 1.8  | Dynamický SOFO systém [6]. . . . .                             | 16 |
| 1.9  | Spektrum vlnových délek DTS-Ramanova senzoru [5]. . . . .      | 17 |
| 1.10 | Schéma zapojení DVS systému [14]. . . . .                      | 19 |
| 1.11 | Schéma jednoho z možných zapojení systému DAS [11]. . . . .    | 20 |
| 2.1  | Zjednodušené schéma LTI systému. . . . .                       | 23 |
| 2.2  | Znázornění Diracovy funkce. . . . .                            | 25 |
| 2.3  | Plovoucí průměr - potlačení šumu. . . . .                      | 26 |
| 2.4  | Kmitočtové filtry. . . . .                                     | 28 |
| 2.5  | Návrh modifikace kmitočtového filtru. . . . .                  | 29 |
| 2.6  | Návrh pásmové propusti a zádrže. . . . .                       | 30 |
| 2.7  | Ukázka využití korelace na radarovém systému [13]. . . . .     | 31 |
| 3.1  | Blokové schéma zapojení DAS systému. . . . .                   | 33 |
| 3.2  | Úprava původního signálu. . . . .                              | 35 |
| 3.3  | Impulzní charakteristika jednoho záznamu. . . . .              | 36 |
| 3.4  | Impulzní charakteristika více záznamů. . . . .                 | 36 |
| 3.5  | Plovoucí průměr signálu. . . . .                               | 37 |
| 3.6  | Detail zajímavé oblasti. . . . .                               | 38 |
| 3.7  | Zobrazení signálu po použití pásmové propusti. . . . .         | 39 |
| 3.8  | Zobrazení signálu po použití autokorelace. . . . .             | 40 |
| 3.9  | Zobrazení úpravy původního signálu. . . . .                    | 41 |
| 3.10 | Detail zobrazení úpravy původního signálu. . . . .             | 42 |
| 3.11 | Impulzní charakteristika jednoho záznamu. . . . .              | 43 |
| 3.12 | Impulzní charakteristika více záznamů. . . . .                 | 43 |
| 3.13 | Plovoucí průměr signálu. . . . .                               | 44 |
| 3.14 | Detail plovoucího průměru. . . . .                             | 45 |
| 3.15 | Zobrazení signálu po použití pásmové propusti. . . . .         | 46 |
| 3.16 | Zobrazení signálu po použití autokorelace. . . . .             | 47 |
| 3.17 | Detail zobrazení signálu po použití autokorelace. . . . .      | 47 |
| 3.18 | Grafické uživatelské rozhraní - Brno. . . . .                  | 48 |

# ÚVOD

Senzorické měřicí systémy jsou v současné době velmi často využívány k měření různých fyzikálních veličin. Mezi tyto veličiny patří například teplota, tlak, elektrický proud, vibrace apod. Jejich základní rozdělení dle principu činnosti je na senzory bodové a distribuované. Mezi výhody těchto systémů patří vlastnosti optických vláken, hlavně díky jejich odolnosti vůči elektromagnetickému rušení, a také kvalitní výsledky měření dlouhých vzdáleností. Senzory našly využití v širokém spektru oblastí. Kupříkladu ke snímání strukturálního stavu dlouhých silničních mostů či tunelů, ke snímání vibrací na železnicích apod. Nevýhodou těchto systémů je vyšší cena výroby.

Tato práce je věnována rozboru technologií využívaných v senzorických systémech a jejich uplatnění v praxi. Popsány byly zejména optovláknové senzory, které jsou hojně využívány světovými společnostmi na reálných projektech. V neposlední řadě byl také popsán DAS systém, který byl využit k získání signálů pro jejich analýzu v této práci. Dále byly také určeny vhodné filtry pro úpravu signálů, aby bylo docíleno co nejpřesnějších výsledků analýzy. Následně byly reálné náměry signálů zpracovány a analyzovány v programovém prostředí Matlab. Zpracovány byly náměry ze dvou tras. První náměry byly získány na trase v Brně a druhé byly získány na trase v Praze.

U každé aplikace zvolených filtrů na reálných náměrech bylo popsáno jejich nastavení, chování vůči těmto konkrétním signálům, jejich výsledná podoba a bylo vytvořeno grafické uživatelské rozhraní.

# 1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ

V dnešních industrializovaných zemích je jen těžce představitelný život bez železnic, mostů, tunelů, přehrad apod. Tyto stavby velmi ulehčují život obyvatelům, ovšem je zapotřebí sledovat jejich funkčnost a životnost.

Aby se dokázala zajistit bezpečnost a předejít komplikacím, využívá se sledovací systém SHM (Structural Health Monitoring). Existují různé technologie a metody snímání. Účinný systém by měl být schopen detekovat a reagovat v reálném čase. Mezi velmi platné a odolné vůči elektromagnetickému rušení patří optická vlákna. K detekci se využívají diskrétní bodové senzory, distribuované senzory a semidistribuované senzory. Co se týče SHM velmi dobrou schopnost sledování vybrací nabízí distribuované senzory OTDR (Optical time domain reflectometry). V následující části budou rozebrány jejich vlastnosti, výhody a nevýhody využití v praxi.

## 1.1 Rozdělení optovláknových senzorů

Optovláknové senzory se dělí podle různých kritérií. Základní rozdělení vychází z nasazení senzorů na daná optická média a zejména dle využití těchto přenosových cest. Tudíž mohou být snímače rozděleny do dvou tříd:

- Třída senzorů použitelných na optickém médiu, které slouží k přenosu informace.
- Druhá třída senzorů využitelná také na optickém médiu, ovšem které slouží pouze pro detekční účely.

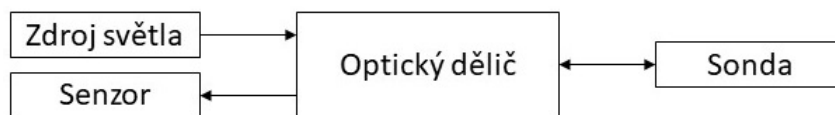
Jak již bylo zmíněno výše, dále mohou být senzory rozděleny podle způsobu snímání. Dle techniky snímání jsou senzory rozděleny na:

- Bodové senzory
- Distribuované senzory
- Semi-distribuované senzory

### 1.1.1 Bodové senzory teploty

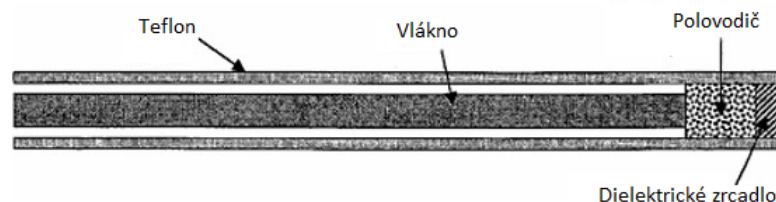
Bodové senzory mají vyšší hodnotu poměru signál/šum než distribuované senzory. Mezi jejich výhody patří zejména vysoká přesnost a také vysoká rychlost měření.

Jedná se o kontaktní senzor, měří teplotu v bodě dotyku s daným objektem. Čím dokonalejší je dotyk senzoru s objektem, tím se zkracuje čas reakce celého senzorického systému. V praxi jsou využívány dvě možné varianty, které vycházejí z velmi podobného principu. Systém svítí do optického vlákna a následně analyzuje světlo, které se odrazí na sondě a vrací se zpět do senzoru [2] [3]. (viz Obr. 1.1)



Obr. 1.1: Bodový senzor teploty.

První varianta využívá absorpčních vlastností krystalu GaAs. Krystal je tvořen sloučeninou gallia a arsenu. Krystal je v kabelu umístěn na jeho konci, absorbuje část spektra a druhou část spektra propouští. Jeho absorpční hrana se mění s teplotou. energii dodávají dopadající fotony, které následně uvolňují elektrony. Fotony s kratší vlnovou délkou přenášejí více energie. S přísunem energie se zvyšuje teplota krystalu a mění zakázané pásmo. Fotony s menší energií (delší vlnovou délkou) jsou absorbovány a kratší vlnové délky prochází a odráží se na dielektrickém zrcadle. Princip ilustruje Obr. 1.2.



Obr. 1.2: Bodový senzor - využití absorpčního krystalu GaAs [3].

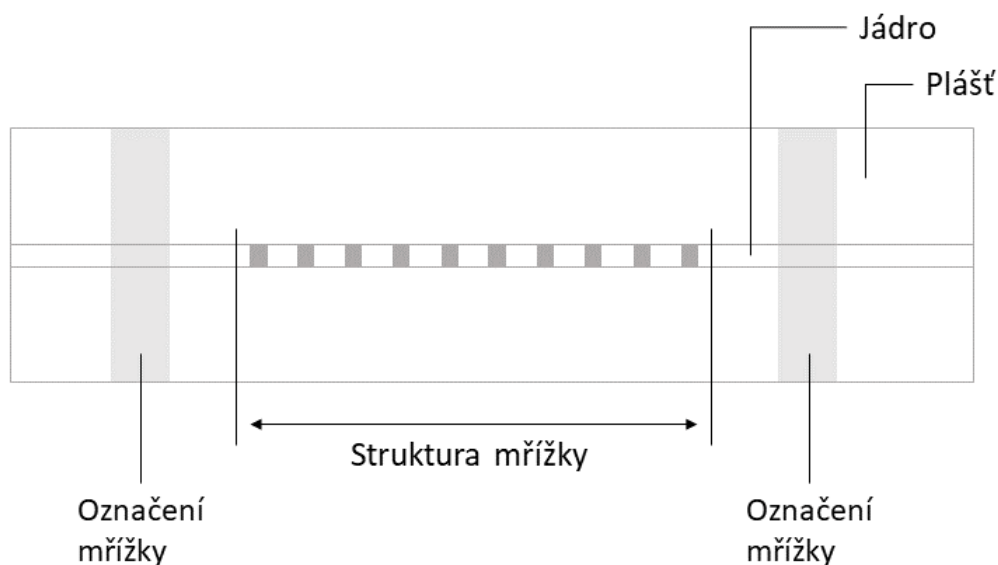
Další využívanou metodou je fluorescence fosforu, který se nachází také na konci vlákna. Fluorescence je fyzikální jev, u kterého dochází k vyzařování světla látkou, která dříve pohltila elektromagnetické záření. Čehož tato varianta využívá. Budící záření dopadá na konec vlákna a zpět se odráží fluorescenční záření, které je nadále zaznamenáno na vyhodnocovacím senzoru.

Obě zmíněné metody jsou v praxi využívány zejména v průmyslu. Konkrétně pro měření teploty vinutí transformátorů VVN a také v oblasti mikrovlnné techniky [2].

### 1.1.2 FBG senzory

Tyto senzory využívají technologie, při kterém je jádro jednovidového optického vlákna rozděleno do struktury o určitém indexu lomu. Tato struktura je srovnatelná s difrakční mřížkou. (viz Obr. 1.3) Struktura je vytvořena pomocí rozdělení zdrojového světla do dvou paprsků, které následně interferují a tvoří periodické změny intenzity, což způsobuje rozdílné hodnoty indexu lomu ve struktuře.

Dalším možným způsobem jak vytvořit mřížku v jádru vlákna je vložení fotomasky do paprsku UV světla. Zápis mřížek je již možný tažením při výrobě. Do jádra jsou přidány příměsi oxidu germania. Délky mřížek se pohybují v jednotkách milimetrů (velmi častá délka je 8 *mm*), ale také až ve stovkách milimetrů. Podle toho, pro které vlnové délky bude senzor využíván, lze určit počet maxim a minim. Nejběžněji se zpracovávají vlnové délky v rozsahu 1510 až 1590 *nm*. Mohou se ovšem objevit i výjimky, které jsou používány např. v pásmu 850 *nm* [2].



Obr. 1.3: Struktura FBG mřížky.

Část zdrojového světla, které je vedeno optickým vláknem prochází FBG mřížkou dále, ovšem paprsky o určité vlnové délce se odráží na mřížce a vrací zpět, fyzikálně se jedná o difrakční proces.

Tento princip je přiblížen na Obr. 1.4 - 1.6. Vstupní signál (Obr. 1.4) prochází mřížkou, spektrum signálu po průchodu přes mřížku je znázorněno na Obr. 1.5. A na Obr. 1.6 je možno vidět spektrum odraženého signálu.



Obr. 1.4: Vstupní signál. Obr. 1.5: Průchozí signál. Obr. 1.6: Odražený signál.

Difrakční proces vychází z Braggova zákona. Tudíž paprsky s vlnovou délkou vyhovující Braggově podmínce jsou odraženy. Tuto podmínku specifikuje rovnice 1.1 [2] [4].

$$\lambda_r = 2n_e\Lambda \quad (1.1)$$

$\lambda_r$  - vlnová délka, která je odražena,  $n_e$  - efektivní index lomu,  $\Lambda$  - perioda mřížky.

Následně pokud je vlákno vystaveno mechanickému namáhání či změně teploty, dojde ke změně FBG mřížky, změní se její perioda, což způsobuje odraz jiných vlnových délek. V případě, že je senzor vhodně zkalibrován, je možno přesně měřit teplotu. Senzor je modifikovatelný, díky čemuž lze měřit také např. tlak, vibrace atd.

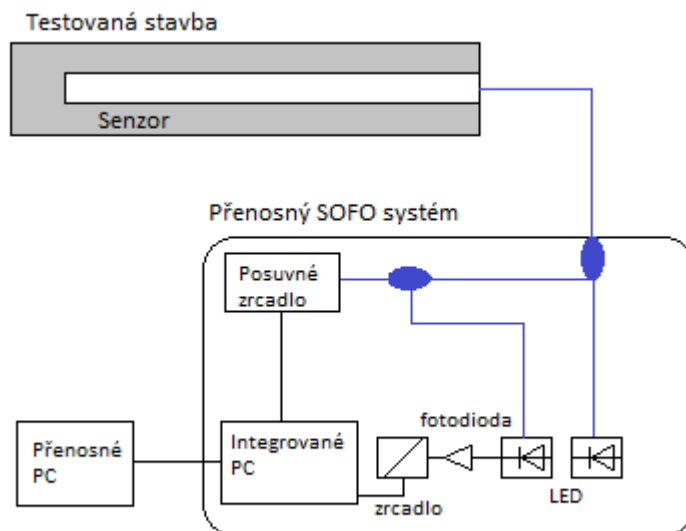
Velkou výhodou této technologie je sériové zapojení jednotlivých senzorů. Pokud je zvoleno pásmo např. v rozsahu 1520 až 1580 *nm* a mřížky jsou optimalizovány pro různé vlnové délky, je možno je v daném pásmu sledovat současně. Velikost měřícího rozsahu a posun vlnových délek ovlivňuje počet mřížek sledovaných současně. Zvolený rozsah je 60 *nm* (pásmo 1520 - 1580 *nm*), uvažovaný posun vlnových délek je +/- 4 *nm* od středové hodnoty, pro oddělení pásem je dán 1 *nm*. Sledovat bude možné tyto vlnové délky: 1525 *nm*, 1535 *nm*, 1545 *nm*, 1555 *nm*, 1565 *nm* a 1575 *nm*. Z tohoto příkladu vyplývá, že bude možno sledovat 6 senzorů současně. Ovšem při vhodnější konfiguraci i několikanásobně více.

### 1.1.3 SOFO senzory

Jedná se o optické snímače vyvinuté Švýcarským spolkovým technologickým institutem v Lausanne. Nyní je komercializován firmou SMARTEC. Senzory pracují s rozlišením v rozsahu mikrometrů a disponují vynikající dlouhodobou stabilitou.

Statický měřicí systém SOFO je založen na principu interferometrie s nízkou koherencí. Zdrojové světlo LED diody prochází jednovidovým optickým vláknem, které je připojeno přes spojku přímo ke dvěma dalším optickým vláknům uloženým ve struktuře, která má být monitorována. První měřicí vlákno je v kontaktu se samotnou strukturou a bude reagovat na její změnu, čímž dojde k deformaci tohoto vlákna. Druhé vlákno, tzv. referenční vlákno, je uloženo volně, dojde tudíž jen k deformaci prvního vlákna. Na konci obou vláken jsou umístěna zrcadla, která odráží světlo zpět na spojku, ta kombinuje tyto dva paprsky a přivádí je na analyzátor. Analyzátor dokáže určit rozdíl mezi těmito dvěma signály, zda došlo k deformaci či ne, pomocí posuvného zrcadla. Při pohybu posuvného zrcadla foto dioda přijímá modulovaný signál pouze tehdy, když dojde k deformaci prvního vlákna. Každé měření poskytuje nové podrobnosti a porovnání s předchozím měření. V systému

je umístěna také SOFO jednotka (viz Obr 1.7), která je schopna ukládat měření a následně tyto data přenášet do PC. Pokud je zapotřebí sledovat více senzorů, je instalován optický přepínač. [7]

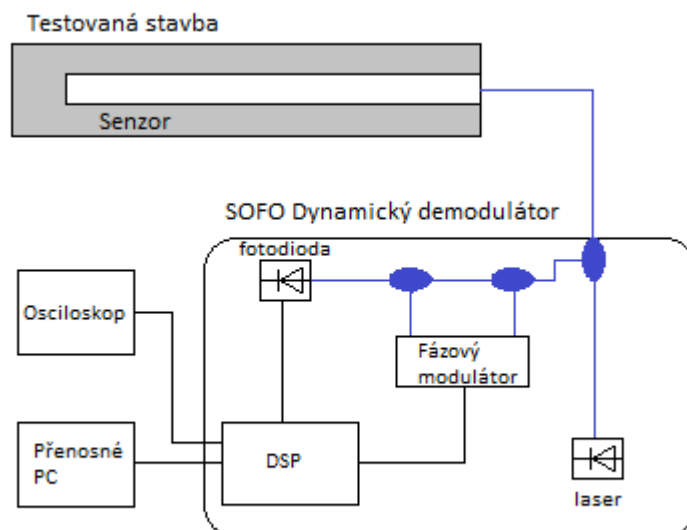


Obr. 1.7: SOFO systém pro statická měření [6].

Dynamická čtecí jednotka SOFO umožňuje měřit při vysokých frekvencích. Jedna čtecí jednotka může být použita k demodulaci až 8 kanálů. Pokud je třeba pracovat s více kanály, lze kombinovat více jednotek. Může být použita i v konfiguraci pro statické měření.

Technologie dynamické čtecí jednotky SOFO je založena na interferometrii s nízkou koherencí heterodynu pracující s vlnovou délkou  $1550\text{ nm}$ . Optický signál je fázově modulován interferometrem. Po detekci čtecí jednotka sleduje fázovou modulaci ze senzorů a zaznamenává rozdíl signálů. Výsledky detekce deformace jsou dostupné v analogové formě na analogových výstupech nebo v digitální podobě pomocí USB připojení. Výsledné signály je pak možno analyzovat dále na externím PC. Pokud je snímání přerušeno, nulový bod je zrušen a je třeba systém znovu zkalibrovat pomocí statické jednotky SOFO.





Obr. 1.8: Dynamický SOFO systém [6].

Tyto senzorické systémy jsou běžně používány v praxi. Systémy jsou instalovány na projektu viaduktu Colle d'Isarco na Italské dálnici, dále také ve Švýcarsku v železničním tunelu dlouhém 57 km napříč Alpami apod.

#### 1.1.4 DTS-Ramanovy a Brillouinovy OTDR senzory

Základním principem těchto distribuovaných senzorů teploty je Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) technologie. První distribuované optické senzory byly použity v roce 1997. Tato technologie byla původně vyvinuta pro telekomunikační průmysl k měření ztrát na optických vláknech a vytvoření ztrátového profilu. Zdrojové světlo se přenáší po celé délce vlákna. Toto vlákno je využito jako snímač teploty. OTDR používá přesné časování pro měření množství rozptýleného odraženého světla ve vlákne. Časování slouží k určení skutečné polohy podél vlákna. Intenzita přijatého signálu je určena k vytvoření ztrátového profilu optického obvodu. [6]

##### OTDR senzory

OTDR je založeno na Rayleighovu rozptylu světla. Rayleighův rozptyl světla je hojně užívaným nástrojem pro práci s optickými vlákny, a to například při určování ztrát na optických cestách, ztrát konektorů, délky optické cesty apod. V tomto případě je ovšem zajímavým bodem snímání narušení a aktivit prostředí podél vlákna. Princip OTDR je následující: do měřicího vlákna je na vstupu vyslán krátký světelný pulz, který se odrazí a zpětně rozptýlené světlo směřuje zpět do systému na analyzační

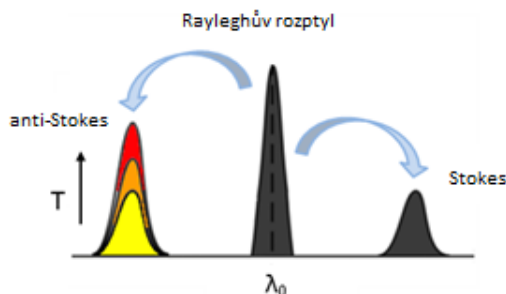
jednotku, kde dojde ke změření časové odezvy a také amplitudy přijatého signálu. Skutečnou polohu ve vlákne je možno určit ze vztahu:

$$z = \frac{c \cdot t}{2n} \quad (1.2)$$

system obdrží zpětný signál v okamžiku  $t$ , kdy byl v pulz v poloze  $z$ ,  $n$  je index lomu vlákna a  $c$  je rychlost světla. Zlomek je ještě vynásoben  $\frac{1}{2}$ , protože se pulz pohybuje po vláknu dvakrát, a to od vstupu na zrcadlo, na kterém dojde k odrazu zpět na analyzační systém.

## Ramanovy OTDR senzory

Stěžejní je pro měření chování signálu v bočních pásmech, ne signál o vysílací vlnové délce (viz Obr. 1.9). Rozptýlená světelná energie také obsahuje Ramanovy a Brillouinovy odrazy, které jsou složeny ze dvou složek, a to ze Stokesova a Anti-Stokesova světla. Stokesova složka má delší vlnovou délku než je Rayleighova vlnová délka, kdežto Anti-Stokesova složka má kratší vlnovou délku. Řídící jednotky snímačů pro Ramanovy a Brillouinovy systémy měří intenzitu světla v rozsahu Stokesových a Anti-Stokesových vlnových délek. Tato naměřená data jsou zpracována OTDR technologií a je vytvořen měřicí profil. [1]



Obr. 1.9: Spektrum vlnových délek DTS-Ramanova senzoru [5].

U Ramanova rozptylu dochází k molekulárním vibracím v jádře optického vlákna v celé jeho délce. Měření molekulárních vibrací, které vychází z kinetické energie vlákna, přímo souvisí s měřenou teplotou. Teplotní profil podél celého optického vlákna lze získat díky schopnosti kvantifikovat míru přijaté Stokesovy a Anti-Stokesovy energie a OTDR technologie. Reálně se k výpočtu využívá změny intenzity Anti-Stokesovy části spektra vůči Stokesově části spektra. Je to umožněno tím, že Anti-Stokesova část mění velikost své intenzity při změně teploty, ovšem Stokesova část je teplotně nezávislá a intenzita je konstantní. [5]

Vztah pro výpočet výsledné teploty:

$$R(T) = \frac{I_{a-S}}{I_S} = \left( \frac{\lambda_S}{\lambda_{a-S}} \right)^4 \exp \left( -\frac{h \cdot c \cdot v}{k \cdot T} \right) \exp(-\Delta a \cdot z) \quad (1.3)$$

kde  $R(T)$  je výsledná teplota,  $I_{a-S}$  je intenzita Anti-Stokesovy části spektra,  $I_S$  je intenzita Stokesovy části spektra,  $\lambda_S$  je Stokesova vlnová délka,  $\lambda_{a-S}$  je Anti-Stokesova vlnová délka,  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $v$  je vibrační frekvence,  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $T$  je termodynamická teplota a  $\Delta a$  je rozdíl optického útlumu mezi Stokesovou a Anti-Stokesovou částí spektra.

Výsledkem Ramanova měření odraženého signálu jsou tedy tisíce hodnot teploty po celé délce optického vlákna.

### Brillouinovy OTDR senzory

Naproti tomu vlnová délka a frekvence Brillouinovy vlny jsou ovlivněny deformací vlákna i teplotní změnou. Brillouinovy vlnové pásma se blíží Rayleighovy vlnové délce a ačkoliv je jejich intenzita relativně vyšší než u Ramana, je mnohem obtížnější filtrování Brillouinových pásem od Rayleighova signálu, což je způsobeno jejich těsnou blízkostí ve spektru vlnových délek. Na snímači je možno sledovat teplotní i deformační stavy podél celého optického vlákna. Ovšem u těchto senzorů je velmi důležitá přesná kalibrace. Systém vyhodnocuje situace jinak, pokud snímá vnější povrch, nebo pokud je instalován spolu s elektrickými rozvody. Taktéž je zapotřebí specifického kabelu, který obsahuje tahové prvky, aby se na vlákno nepřeneslo mechanické namáhání, prvky ovšem způsobují velký nárůst útlumu vlákna. [1]

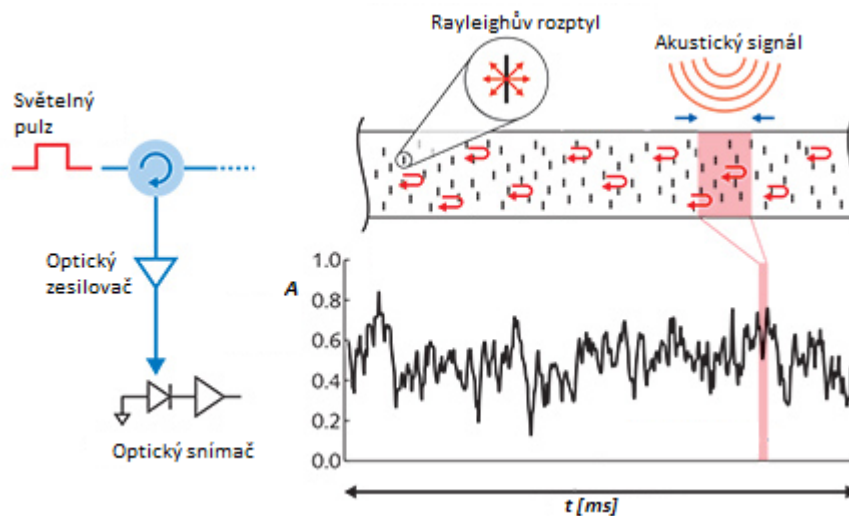
V praxi se objevuje i paralelní použití Ramanova a Brillouinova senzoru, aby bylo docíleno přesnějších měření. Technologie DTS je využívána jako požární systém v tunelech, v geotechnice, při monitoringu kabelů VVN a produktovodů, sledování skládek uhlí apod.

### 1.1.5 DVS senzory

Distribuované snímače vibrací jsou používány pro detekování narušení sledovaného objektu. Poskytují vysokou citlivost snímání vibrací a také jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení, jako všechny senzorické systémy tohoto typu. Myšlenka je založena na demodulaci přijatého rozptýleného Rayleighova signálu z optického vlákna. Senzor dokáže zaznamenat změny v prostředí podél celého optického vlákna, při změně dochází k deformaci vlákna. Citlivost DVS systémů je omezena útlumem fáze a vysoce nelineární amplitudovou odezvou. [8] [14]



signálu může být ověřena působením známého signálu na vlákno, často se jedná například o sinusový signál. K výpočtu zkreslení tohoto harmonického signálu poslouží Rychlá Fourierova transformace (FFT). Rovněž může být odezva intermodulačního zkreslení testována vystavením měřicího vlákna dvěma tónům (zvukovým vlnám) současně. Testováním konvenčními snímači bylo zjištěno, že harmonické zkreslení závisí zejména na použitém akustickém zdroji, ne na mechanismu snímání DAS. Distribuované akustické senzory nevykazují žádné přeslechy v mezi snímanými kanály. Tato skutečnost lze jednoduše otestovat působením akustického signálu v určitém bodě snímacího vlákna, aktivita je pozorována v tomto daném místě, ovšem působení není zaznamenáno v žádné další části vlákna. [9]



Obr. 1.11: Schéma jednoho z možných zapojení systému DAS [11].

### Vzorkovací frekvence

Rychlost vzorkování signálu v akustických sensorických systémech je závislá na době průchodu optického pulsu vláknem. Aby se dokázalo zabránit přeslechu, ve vlákne by se měl vyskytovat jen jeden puls v daném čase. Rychlost světla v optických kabelech činí přibližně  $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , což znamená, že maximální vzorkovací frekvence je  $10 \text{ kHz}$  pro vlákno o délce  $10 \text{ km}$ , pro vlákno dlouhé  $1 \text{ km}$  bude vzorkovací frekvence odpovídat  $100 \text{ kHz}$  atd. Akustickou vzorkovací frekvenci je možné zvýšit prokládáním vstupních pulzů pomocí již známých telekomunikačních technik, a to tak, že bude vysíláno z více zdrojů světla o různých vlnových délkách. Čímž bude dosaženo vyšší vzorkovací frekvence, než bylo zmiňováno.

## Šířka akustického pásma

Akustická šířka pásma senzorů je zpravidla v praxi limitována fyzickým přenosem akustického signálu ze zdroje přes okolní prostředí až na snímací vlákno. Funkce snímacího akustického mechanismu šířku pásma neomezuje. Například v praxi byly měřeny nízké frekvence jako  $8\text{ MHz}$ , u nichž byla i tak přesně detekována aktivita, předpokládá se, že je systém schopen detekování i u nižších frekvencí. Taktéž byly měřeny vysoké kmitočty okolo  $49,5\text{ kHz}$  na vláknu dlouhém  $1\text{ km}$  o vzorkovacím kmitočtu  $100\text{ kHz}$  a stejně jako u nízkých frekvencí bylo dosaženo přesného výsledku. Avšak nutností je vždy dodržet Nyquistův teorém o vzorkovací frekvenci, kdy musí být vzorkovací kmitočet minimálně dvakrát větší než maximální frekvence vzorkovaného signálu.

## Dynamický rozsah systému

Dynamický rozsah senzoru může být demonstrován na jednoduchém příkladu. Na optické vlákno o délce 2 metrů je zavěšeno závaží o určité hmotnosti, závaží je zavěšeno po danou dobu a poté je uvolněno. Vlákno tak působí jako pružina, která vykazuje jednoduchý tlumený harmonický pohyb a v tomto momentě DAS systém měří dynamické namáhání vlákna. Pro tento experiment bylo vlákno nataženo o  $10\text{ mm}$ . Harmonický pohyb naprosto odpovídá standardu referenčního akcelerometru. V testu bylo vyzkoušeno natažení maximálně o již zmiňovaných  $10\text{ mm}$ , protože už se jednalo o hraniční hodnotu prodloužení a hrozilo přetržení vlákna, systém nepřetržitě měřil až do doby, kdy byl signál ztracen v systémovém šumu, což je adekvátní natažení pod  $10\text{ mm}$ . Tímto způsobem byl zjištěn dynamický rozsah  $120\text{ dB}$  pro nízkofrekvenční akustickou energii, s vysokou citlivostí deformace pod  $5\text{ nS}$  [10].

## Prostorové rozlišení

Důležitým faktorem pro určení prostorového rozlišení akustického sensorického systému je délka vstupního optického pulzu. Kupříkladu pulz o časové délce  $10\text{ ns}$  dokáže ve vláknu snímat dráhu dlouhou  $1\text{ m}$ , pokud je poskytovaná optoelektronická přenosová rychlost dostatečně vysoká. Dalším faktorem souvisejícím s prostorovým rozlišením je vzorkovací rozlišení, které určuje vzdálenost mezi po sobě jdoucími vzorky. Výraz vzorkovacího rozlišení je často zaměňován s termínem pro prostorové rozlišení. V praxi používané systémy DAS umožňují prostorové rozlišení v rozsahu od  $1\text{ m}$  do  $10\text{ m}$ , se vzorkovacím rozlišením až do  $25\text{ cm}$ . K dosažení přesného prostorového rozlišení je zapotřebí rychlého zpracování přijatého signálu, což navyšuje složitost při návrhu samotného DAS systému.

## Měřicí rozsah

Maximální dosažitelný měřicí rozsah určují dva faktory. Prvním faktorem jsou optické ztráty ve vláknu, druhým je počet vzorků, které je systém schopen zpracovat. DAS senzory využívají k měření optimální vlnovou délku okolo  $1550\text{ nm}$ , což umožňuje jedinému systému dosáhnout vzdálenosti až  $40\text{ km}$  s dobrým poměrem signál/šum. Přidáním optických zesilovačů, které jsou běžnou součástí optických komunikačních systémů, se zvýší snímaná vzdálenost až na  $80\text{ km}$  a dojde k zanedbatelnému snížení poměru signál/šum.

DAS systémy sestavené současným hardwarem jsou schopny zpracovat více než 40 000 snímaných vzorků, to znamená, že samotný systém je schopen vzorkovat vlákno dlouhé  $40\text{ km}$  se vzorkovacím rozlišením  $1\text{ m}$ . Po přidání optických zesilovačů se vzdálenost zdvojnásobí na  $80\text{ km}$  a vzorkovací rozlišení bude  $2\text{ m}$  [10].

V krátkém shrnutí tedy každé akustické vlnění tvoří akustickou energii, kterou absorbují molekuly v jádře vlákna, to způsobuje fázový posuv zpětně rozptýleného světla, následně je světlo detekováno a analyzováno jednotkou DAS.

Využití v praxi našly tyto systémy například v oblasti železniční dopravy, ve sledování seismické aktivity apod. Jejich výhodou je obzvláště možnost instalace na jednovidová optická vlákna v již sestavených telekomunikačních trasách. [11]

## 2 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ

Zpracování signálů neboli Signal processing (SP) se zabývá analýzou a zpracováním signálů pomocí vyhrazených systémů. Slouží k získání či modifikaci přenášené informace. Tento proces je nezbytný, protože signály běžně obsahují informace, které nejsou čitelné (zkreslené signály) pro analyzační systémy, popřípadě jsou signály zašumělé apod. Přestože je mnoho signálů přenášeno neelektricky, je běžné je před zpracováním převádět do elektrické podoby.

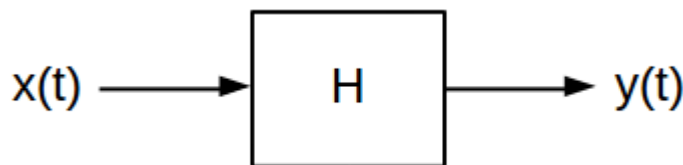
Dřívější analogové systémy ASP nahradily systémy digitální DSP (Digital Signal Processing), ovšem analogové systémy jsou využívány i v nynější době a budou využívány i v budoucnu. Digitální systémy předčily ASP zejména ve vyšší výkonnosti, rychlosti, spolehlivosti, taktéž v efektivnějším ukládání a v nižší cenové náročnosti. Mimo jiné DSP může řešit problémy, kterých analogové systémy nejsou schopny, jako je spektrální analýza vícesložkových signálů, adaptivní filtrování a operace s velmi nízkými kmitočty.

Největší rozkvět digitálního zpracování signálů přišel v 90. letech, kdy DSP neovlivnilo pouze tradiční oblasti elektrotechniky, ale také oblasti ekonomie, meteorologie, seismologie, bioinženýrství atd.

### 2.1 Impulzní charakteristika

Impulzní charakteristika patří mezi nástroje, díky kterým je možno definovat lineární časově invariantní systémy (LTI). Je jednou z možností, jak vyjádřit vlastnosti systému a závislost vstupu na výstupu systému. Mezi další metody schopny přesně vymezit vlastnosti systémů patří frekvenční charakteristika.

Zjednodušeně lze formulovat impulzní funkci jako odezvu systému na jednotkový impuls, který je přiveden na vstup. Grafickým vyjádřením této funkce je samotná impulzní charakteristika. Tento systém je blokově znázorněn na následujícím obrázku. [12]



Obr. 2.1: Zjednodušené schéma LTI systému.

V zásadě funkce  $H$  převádí vstupní signál  $x(t)$  na odpovídající výstupní signál  $y(t)$ . Existuje mnoho typů systémů LTI, které transformují procházející signál různým způsobem. Ale všechny jsou založeny na dvou klíčových charakteristikách.



- Systém je lineární, tudíž splňuje princip superpozice. Jednoduše řečeno, pokud jsou lineárně kombinovány dva signály a následně přivedeny na vstup, výstupem je stejná lineární kombinace signálů, jako kdyby byly přivedeny na vstup jednotlivě. To znamená, že pokud vstupu  $x_1(t)$  odpovídá právě výstup  $y_1(t)$  a vstupu  $x_2(t)$  náleží výstup  $y_2(t)$ , totéž platí pro všechny hodnoty  $a_1$  a  $a_2$ .

$$H\{a_1x_1(t) + a_2x_2(t)\} = a_1y_1(t) + a_2y_2(t) \quad (2.1)$$

- Dalším případem jsou časově invariantní systémy, u kterých se jejich vlastnosti s časem nemění. Pokud dojde ke zpoždění vstupního signálu, toto zpoždění bude viditelné i na výstupu. Pro vstupní signál  $x(t)$ , který je převeden na výstupní signál  $y(t)$ , platí pro všechny hodnoty  $\tau$ .

$$H\{x(t - \tau)\} = y(t - \tau) \quad (2.2)$$

Diskrétní LTI systémy mají stejné vlastnosti, rozdíl spočívá v diskrétní a analogové formě, ovšem jinak jsou si velice podobné. Impulzní charakteristika umožňuje přesně charakterizovat fungování systému.

U analogových systémů se používá Diracova funkce  $\delta(t)$ . Zatímco u diskrétních systémů se obvykle používá funkce Kroneckerovo delta  $\delta[n]$ . Jak již bylo zmiňováno impulzní charakteristika je definována jako odezva samotného systému na Diracův jednotkový impuls. Běžně je funkce impulzní charakteristiky označována pro analogové systémy  $h(t)$  a pro diskrétní systémy  $h[n]$ . [12]

Výhodou je možnost predikovat výstup systému v časové oblasti. Pokud je vstupní signál rozložen v množině na více složek, výstup je poté roven součtu hodnot výstupní funkce jednotlivých složek. V případě, že by došlo k časovému posunutí jednotlivých složek, projevílo by se posunutí i na výstupu stejným způsobem.

U diskrétních systémů je to možné, protože je možno definovat signál  $x[n]$  jako množinu složek, u kterých došlo například k časovému posunutí a jiným úpravám. Následně lze popsat tento signál pomocí funkce Kroneckerovo delta.

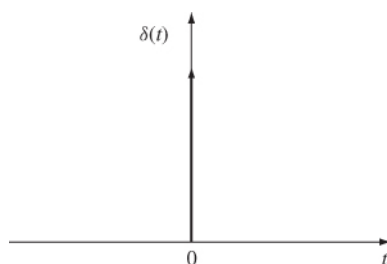
$$x[n] = \sum_{k=0}^{\infty} x[k]\delta[n - k] \quad (2.3)$$

Každá složka v množině má určitou hodnotu  $x[n]$  v daném čase. Výstup  $y[n]$  je dále možno definovat následujícím vztahem:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{\infty} x[k]h[n - k] \quad (2.4)$$

kde  $h[n]$  je funkce impulzní charakteristiky. Výše uvedený vztah je konvoluční teorém pro diskrétní systémy. To znamená, že vstupujícímu signálu  $x[n]$  do diskrétního systému náleží výstup  $y[n]$ , který je roven diskrétní konvoluci vstupního signálu a funkcí impulzní charakteristiky.

U analogových systémů nelze dostatečně detailně matematicky popsat jednotlivé stavy, tak jako to bylo znázorněno v předešlém vztahu pro diskrétní systémy, což je způsobeno vlastností Diracova impulzu, který má jen v nulovém bodě na ose  $x$  nenulovou hodnotu a je nekonečně vysoký. Pro jasnější představu poslouží následující obrázek.



Obr. 2.2: Znázornění Diracovy funkce.

Pro definici lze znovu použít modifikovaný konvoluční teorém:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (2.5)$$

kde je  $h(t)$  také funkce impulzní charakteristiky. Existuje několik způsobů, jak odvodit tento vztah a záleží také na konkrétních vlastnostech systému.

Nicméně z výše uvedeného popisu je jasné, že je impulzní charakteristika velmi užitečná a v praxi hojně využívaný nástroj pro charakteristiku různých systémů.

## 2.2 Plovoucí průměr

Plovoucí průměr je běžným a velmi účinným filtrem v oblasti zpracování digitálních signálů. Filtér je optimální pro odstranění náhodného šumu, při kterém nedojde ke zkreslení relevantního signálu. Tudiž dojde ke zvýšení hodnoty poměru signál/šum. Plovoucí průměr patří mezi velmi vhodné filtry pro zpracování signálu v oblasti času. Jeho nevýhodou je ovšem zpracování signálů ve frekvenční oblasti, nedokáže přesně separovat jednotlivá frekvenční pásma. Mezi funkčně podobné filtry patří například Gaussův a Blackmanův filtr, které dosahují lepších výsledků ve frekvenčních oblastech, nicméně na úkor zvýšeného výpočetního času.

Jak z názvu vyplývá, filtr průměruje hodnoty naměřeného signálu. Výpočet výstupního signálu je potom řešen v následující rovnici:

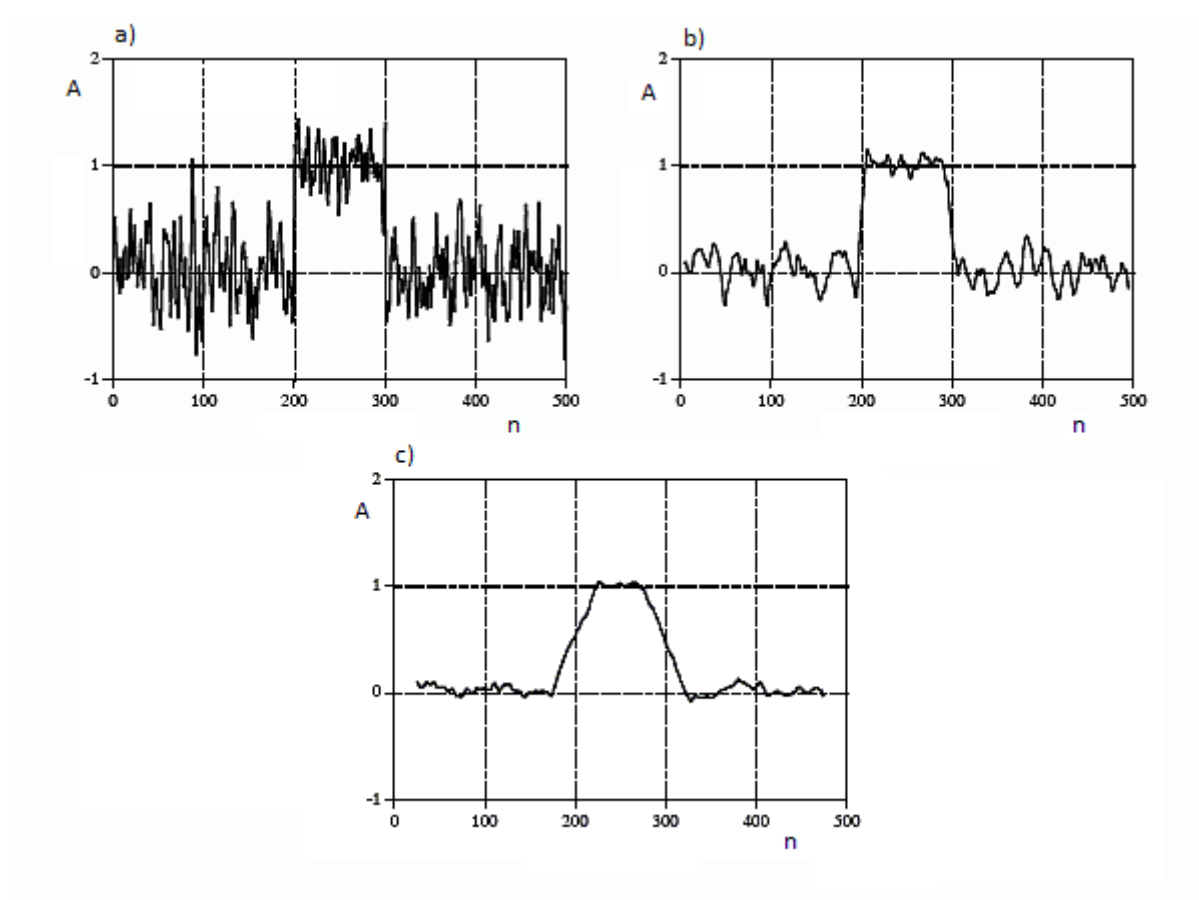
$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \quad (2.6)$$

kde  $x$  je vstupní signál,  $y$  výstupní signál a  $M$  je počet použitých hodnot.

Frekvenční odezva  $M$  použitých hodnot při průměrování je matematicky definována ve vztahu:

$$H[f] = \frac{\sin(\pi f M)}{M \sin(\pi f)} \quad (2.7)$$

kde  $M$  je počet hodnot použitých při průměrování.



Obr. 2.3: Plovoucí průměr - potlačení šumu.

Na Obr. 2.3 je znázorněna funkce odstranění nežádoucího šumu. V části a) je příchozí signál obsahující relevantní informace ale také náhodný šum, který je třeba odstranit popřípadě alespoň částečně potlačit. Na grafech b) a c) je už dobře viditelný pokles amplitudy náhodného šumu. Na grafu c) už ovšem dochází i k deformaci

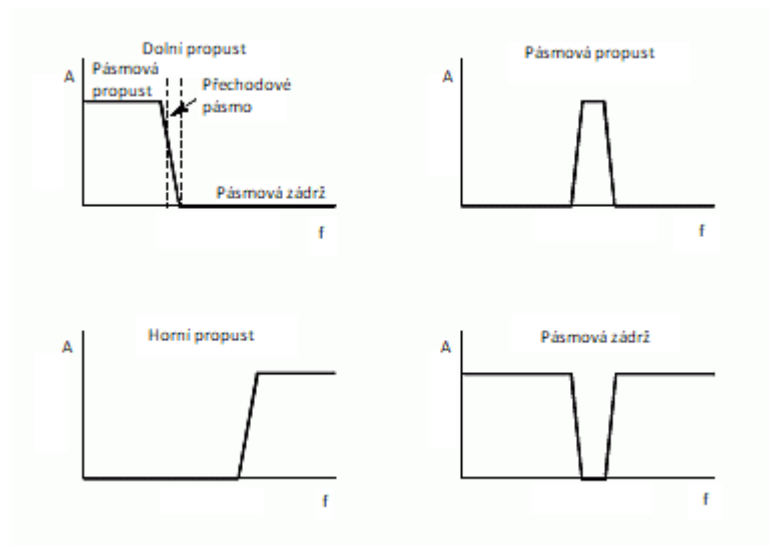
signálu samotného, což se projevuje na ostrosti hrany. Úroveň redukce šumu je dána odmocninou z celkového počtu bodů v nastavení filtru, čímž je myšleno celkové potlačení výkonu šumu. Tudíž pokud bude filtr plovoucího průměru nastaven na 100 bodů, úroveň potlačení šumu bude 10.

Nejlepších výsledků při filtraci signálu je dosaženo ošetřením všech vstupních hodnot signálu (nejsou přednostně ošetřeny jen některé vzorky), což je samotná vlastnost plovoucího průměru. Jak již bylo výše zmiňováno, algoritmus plovoucího průměru je velmi rychle zpracovatelný, jedná se o jeden z nejrychlejších dostupných a používaných digitálních filtrů.

## 2.3 Kmitočtové filtry

Jedná se o základní způsob zpracování signálů, a proto se kmitočtové filtry vyskytují v různých podobách a odvětvích zabývajících se zpracováním signálu. Účelem kmitočtových filtrů je umožnit, aby některé kmitočty mohly procházet beze změny a jiné kmitočty byly zcela potlačeny. Filtr pásmové propusti je označován jako filtr, který propouští signál jen o určitých frekvencích, zatímco filtry pásmové zádrže potlačují dané kmitočty. Přechodové pásmo se nachází mezi pásmovou propustí a zádrží, jde o rozsah frekvencí, který umožňuje přechod mezi těmito pásmy při zpracování signálu. Místo mezi pásmovou propustí a přechodovým pásmem se nazývá mezní frekvence. Při filtraci analogových signálů je mezní frekvence obvykle definována jako oblast, kde dojde k poklesu amplitudy o  $-3\text{ dB}$ . U filtrace digitálních signálů není přesně vymezena úroveň amplitudy signálu, z které je následně odvozena hodnota mezní frekvence. Běžně je mezní frekvence definována na amplitudové úrovni 99%, 90%, 70,7%, a 50% [13].

Kvalitní kmitočtový filtr a jeho správnou funkci určují tři následující parametry. Přechodové pásmo musí být co možná nejužší, čímž v podstatě dochází k rychlé filtraci daných kmitočtů a nedochází ke zkreslení. Dále musí být stabilní samotný systém, aby nedocházelo ke změnám charakteristiky tohoto filtru, což by způsobovalo změnu mezních kmitočtů a tudíž nepřesnou úpravu filtrovaných signálů. Také je nutné, aby byla vhodná pásmová zádrž, která dostatečně potlačí zvolené kmitočty. U kmitočtových filtrů se v základu neřeší nastavení parametrů fáze, protože ve frekvenční oblasti není důležitá. Například fáze audio signálů je téměř zcela náhodná a obsahuje málo užitečných informací. Pokud je zapotřebí s fází pracovat, je nutno přidat další softwarovou nastavbu. Poté v ideálním případě procházejí signály filtrem bez fázového posunu. U reálných filtrů ovšem k fázovému posunu dochází. Co se týče analogových signálů, lze těchto výsledků dosáhnout jen s těží. Ovšem všechny tyto výše popsané vlastnosti kmitočtových filtrů jsou jen zobecněny. A u různých případů je třeba tyto parametry modifikovat, čímž jsou například signály EKG apod.



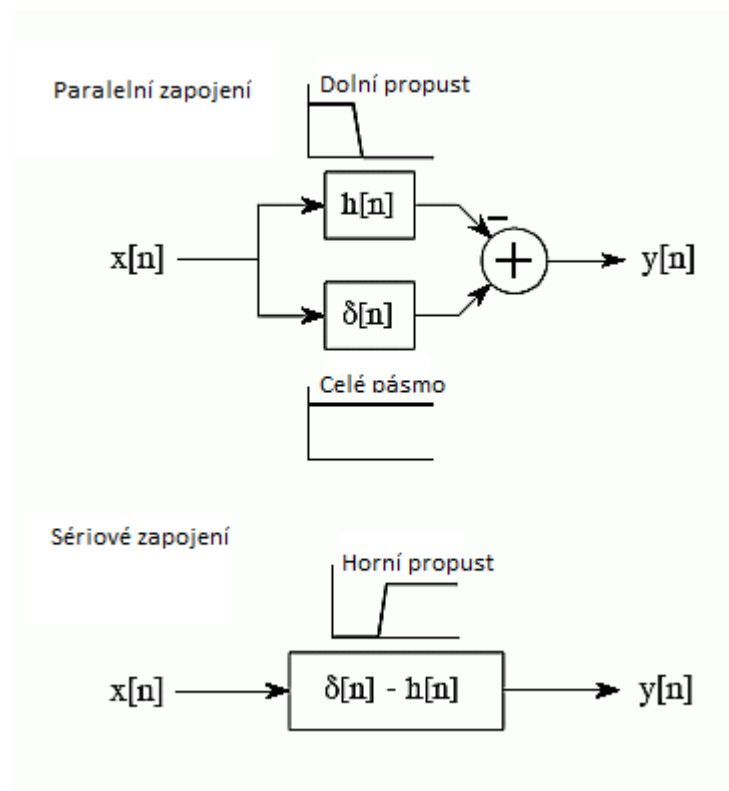
Obr. 2.4: Kmitočtové filtry.

Horní propust, pásmová propust a pásmová zadrž jsou původně navrženy z modelu dolní propusti, u kterého následně dochází k požadovaným úpravám.

Na následujícím obrázku jsou znázorněny možné úpravy pro dosažení tíženého výsledku.

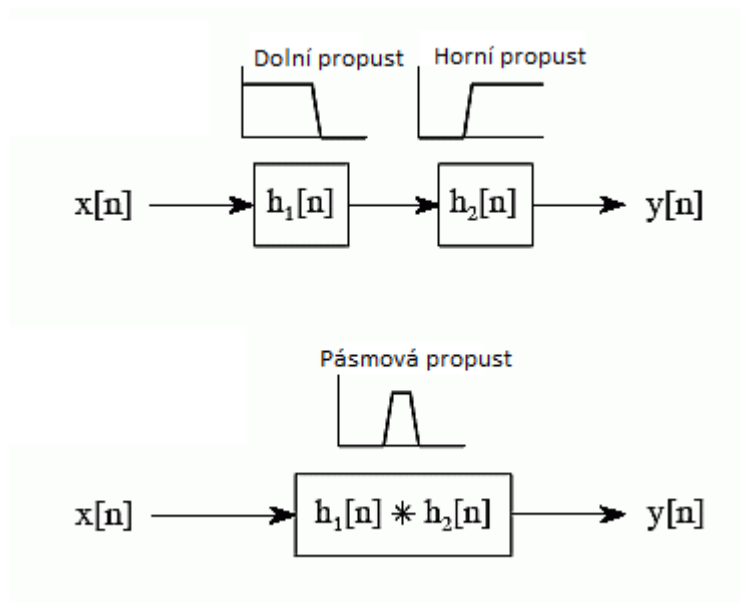
První blokové schéma v horní části obrázku vyobrazuje paralelní funkční zapojení. Vstupní signál  $x[n]$  je přiveden paralelně na dva systémy. První z těchto systémů je dolní propust s funkcí impulzní charakteristiky  $h[n]$ . Druhý systém nečiní nic se signálem a tato část obsahuje impulzní charakteristiku  $\delta[n]$ , což formuluje celopásmový filtr. Celkový výstup  $y[n]$  je roven impulzní charakteristice  $\delta[n]$  minus výstup dolní propusti a impulzní charakteristiky  $h[n]$  v horní větvi. Vzhledem k tomu, že složky s nízkým kmitočtem jsou odečteny od původního signálu, tak se na výstupu objeví pouze části s vysokým kmitočtem, čímž se vytvoří filtr horní propusti.

Jak je vidět na druhém schématu, tato operace může být provedena sloučeně kombinací těchto filtrů. Paralelní systémy s přidáním výstupy funkce impulzní charakteristiky mohou být kombinovány do sériového zapojení. Jak je vidět na obrázku, filtr horní propusti je dán:  $\delta[n] - h[n]$ . To znamená, že dochází ke změně znaménka u všech vzorků a následně je vzorek symetricky přidán do středu. Aby tato technika fungovala, musí být fáze signálu nízkých frekvencí, které jsou na výstupu filtru, stejná jako u původního signálu. Jinak nedojde k dostatečnému potlačení těchto nízkých frekvencí. Proto musí mít systém nulové nebo lineární fázové posunutí. Ovšem samozřejmě existuje více způsobů realizace těchto systémů.



Obr. 2.5: Návrh modifikace kmitočtového filtru.

Na Obr. 2.6 je možno vidět kombinaci filtrů dolní a horní propusti, které vytváří filtr pásmové propusti a zádrže. Zjednodušeně sériové zapojení těchto funkcí produkuje filtr pásmové zádrže, zatímco použitím konvoluce je dosaženo pásmové propusti.



Obr. 2.6: Návrh pásmové propusti a zádrže.

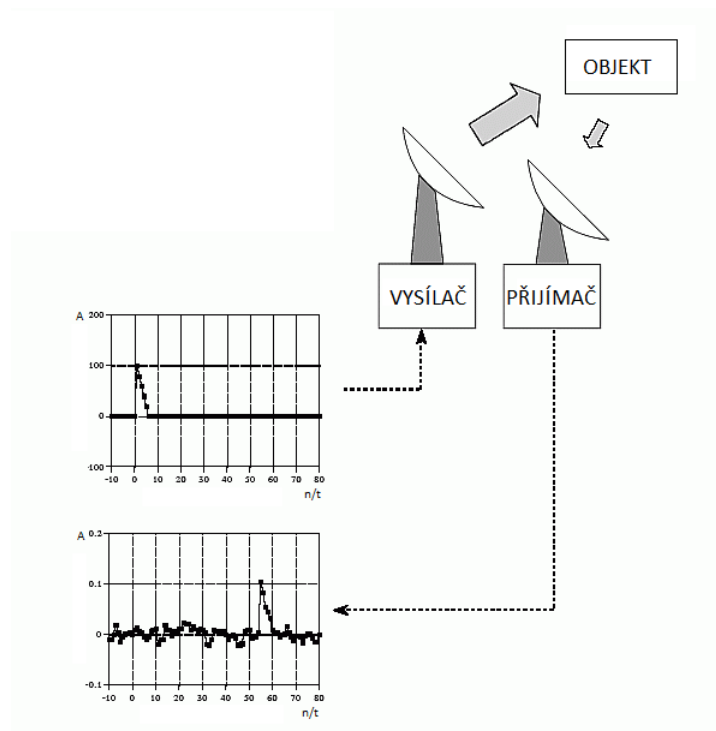
## 2.4 Korelace

Koncept korelace lze jednoduše popsat pomocí radarového systému viz Obr. 2.7. Speciálně navržená anténa vysílá krátké shluky radiových vln v nastaveném směru. Pokud vysílaný signál dopadne na vzdálený objekt, (může se jednat například o helikoptéru, letadlo, apod.) odrazí se část energie zpět na přijímač umístěný v blízkosti vysílače. Vysílaný signál je pilový. Přijatý signál se skládá ze dvou částí: 1. část je signál časově posunutý s nižším výkonem, než byl původní výkon vysílaného signálu, 2. část obsahuje náhodný šum, který je způsoben rušením radiových vln.

Vzhledem k tomu, že je známa rychlost šíření radiových vln, která je přibližně rovna rychlosti světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ), dokážeme pomocí časové odezvy mezi vysílaným a přijatým pulzem určit polohu, kde se objekt nachází. Ovšem problém spočívá ve výpočtu časové odezvy. A k tomuto slouží korelační operace, určí pozici vysílaného pulzu (známý první průběh vysílaného signálu na Obr. 2.7) v přijatém signálu. Výsledkem je signál, který určuje tzv. souvztažnost signálů v daném vzorku.

Korelace je matematická operace podobná konvoluci. Stejně jako u konvoluce jsou použity dva signály pro výpočet třetího signálu. V případě dvou rozdílných signálů se jedná o vzájemnou korelaci těchto dvou vstupních signálů. Pokud je korelován jen jeden signál, jedná se o autokorelaci.

Jedná se o optimální techniku pro detekci známého průběhu v náhodném šumu. Pro správné fungování systému je nutno, aby amplituda relevantního signálu byla vyšší, než amplituda samotného šumu, tudíž musí být dostatečně vysoká hodnota



Obr. 2.7: Ukázka využití korelace na radarovém systému [13].

poměru signál/šum. V případě, že je hodnota nízká, je třeba před výpočtem korelace zpracovat signál jiným filtrem. Její naprostá přesnost je teoreticky dána jen pro rušení náhodným bílým šumem.

Pro porovnání korelace a konvoluce dobře poslouží korelační stroj a konvoluční stroj, které jsou téměř totožné až na malou výjimku. Signál uvnitř konvolučního stroje je převrácen, což znamená, že sekvence vzorků (např. 1,2,3,4...) bude načítána zprava doleva. V korelačním stroji k tomuto převrácení signálu nedochází a je čten běžným způsobem zleva doprava.

Přestože matematicky jsou si korelace s konvolucí velice podobné, představují velmi odlišné zpracování signálu. Konvoluce reprezentuje vztah mezi vstupním signálem systému, výstupním signálem a funkcí impulzní charakteristiky. A jak již bylo zmiňováno korelace je způsob, jak rozpoznat známý průběh, který je rušen náhodným šumem.

### 2.4.1 Výpočet korelace analogových signálů

Korelace mezi dvěma analogovými deterministickými signály  $s(t)$  a  $h(t)$  je definována tímto vztahem:

$$r(t) = s(t) \star h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(-\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (2.8)$$



kde  $r(t)$  je korelační funkce, kterou tvoří množina korelačních koeficientů  $r$ .

### 2.4.2 Výpočet korelace diskrétních signálů

Korelace mezi dvěma diskrétními signály  $s(n)$  a  $h(n)$  je zde definována tímto vztahem:

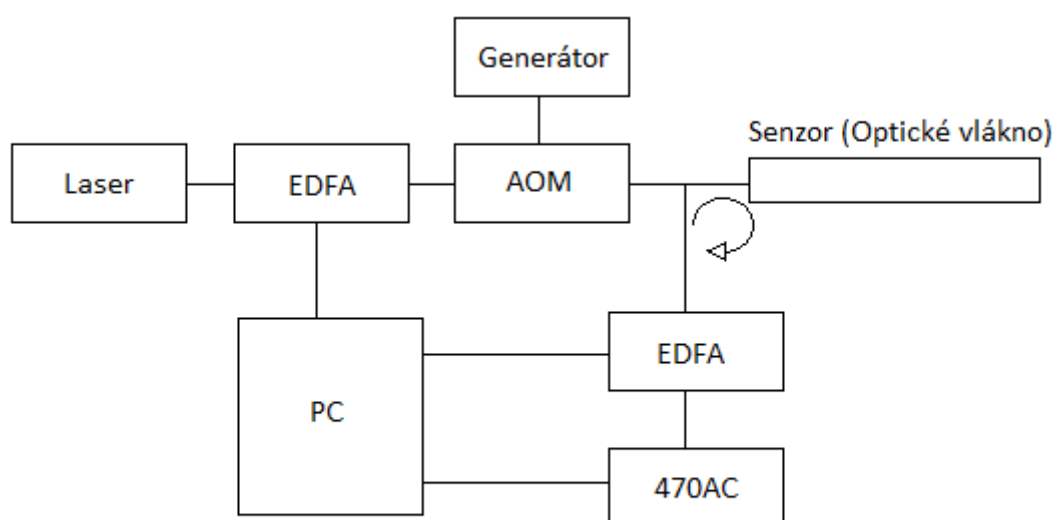
$$r(n) = s(n) \star h(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(-k) \cdot h(n - k) \quad (2.9)$$

kde stejně jako v předchozím případě je  $r(n)$  korelační funkce.

## 3 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH SIGNÁLŮ

### 3.1 Použitý DAS systém

Tento sestavený systém byl použit na trase v Brně a v Praze. Optický kabel na trasách byl spojen optickými konektory, což způsobovalo některé nepřesnosti, které budou patrné níže v textu. V prvním případě byly očekávány aktivity působící na senzor neboli optické vlákno. V druhém případě aktivity nebyly přímo specifikovány a tudíž nebyla záruka jejich záznamu. U jednotlivých měření došlo k menším softwarovým úpravám systému a na trase v Brně byl zvolen vzorkovací kmitočet  $2\text{ kHz}$  a na trase v Praze  $3\text{ kHz}$ . Následně byly naměřené signály zpracovávány.



Obr. 3.1: Blokové schéma zapojení DAS systému.

### 3.2 Náměry - trasa Brno

Jak již bylo zmiňováno analyzované signály byly naměřeny senzorickým systémem, který snímal aktivitu prostředí podél celého měřicího vlákna. Signály byly naměřeny v Brně. A na trase byl nasazen distribuovaný akustický senzor (DAS). A také snímání závisí na vlastnostech akustického vlnění, které tvoří akustickou energii, tu absorbují molekuly v jádře vlákna a způsobují fázový posuv zpětně se šířícího rozptýleného světla, následně je světlo detekováno a zpracováno analyzační jednotkou.

Výsledkem měření senzorického systému byl vysílaný vstupní signál  $h$ , detekovaný odražený signál  $p$  a časování jednotlivých vzorků  $t$ . Přijatý signál je synchronizovaný těmito časovými záznamy.

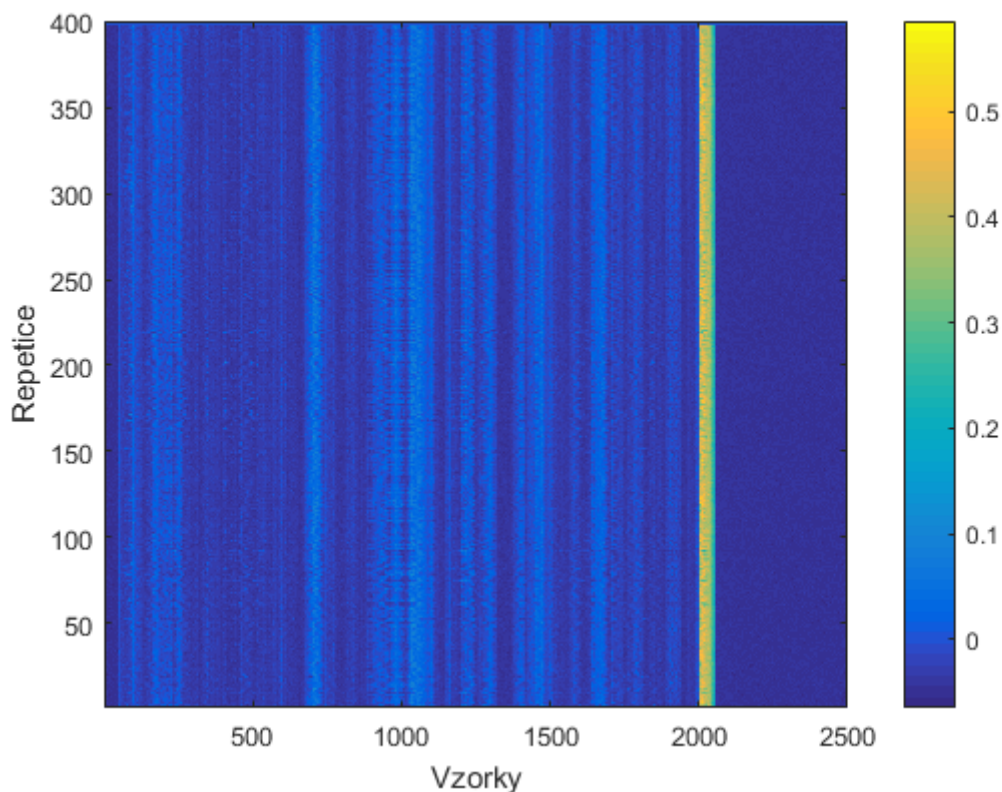
Při měření došlo k fluktuaci stejnosměrné složky, což bylo pravděpodobně způsobeno kolísáním optického zesilovače.

Následně byly náměry zpracovány v programu Matlab a analyzována aktivita v prostředí.

### 3.2.1 Úprava původního signálu

Původní signál ze senzorického systému bylo třeba upravit, aby bylo možno ho filtrovat a nadále analyzovat zaznamenanou aktivitu. Pomocí vysokých špiček vyskytujících se v signálu byl průběh rozdělen na takzvané repetice, které reprezentují periodicky se opakující snímání aktivity po celé délce vlákna.

Na grafu původního upraveného signálu (Obr. 3.2) je již vidět odraz impulzu od konce vlákna v oblasti 2000. vzorku. Ovšem signál je stále velice zašumělý a je téměř nemožné detekovat zajímavou oblast, ve které došlo k záznamu nějaké aktivity. Je proto nutné použít vhodné filtry pro další zpracování signálu, jimiž bude potlačen vzniklý šum a relevantní informace budou lépe čitelné.



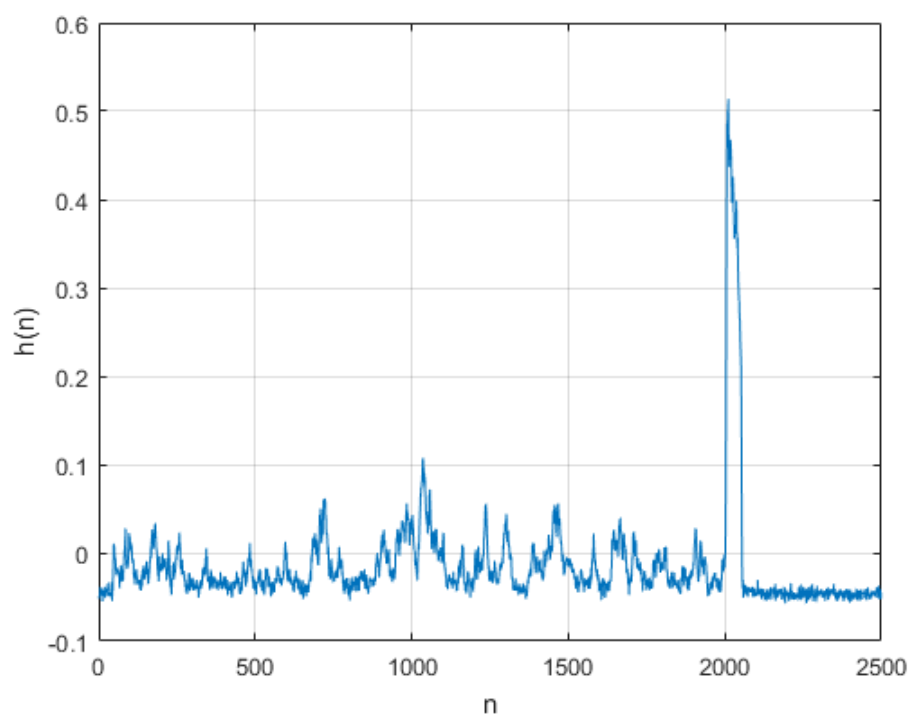
Obr. 3.2: Úprava původního signálu.

### 3.2.2 Impulzní charakteristika

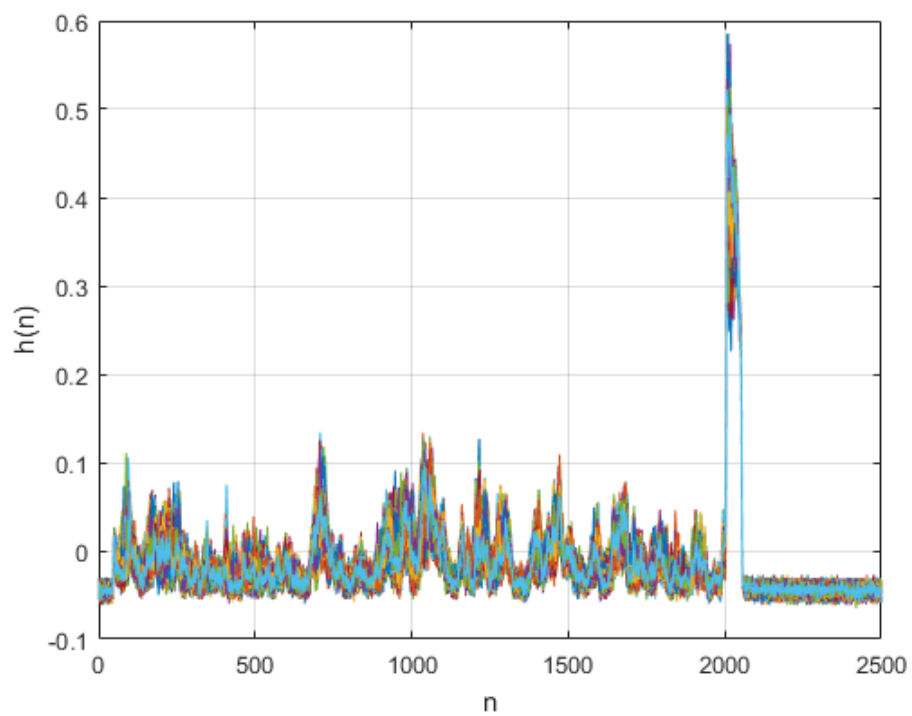
Impulzní charakteristika, jak již bylo výše zmíněno, je výstupní signál závislý na vstupním pulzu. Tudíž dva odlišné systémy budou mít i různé charakteristiky. Funkce impulzní charakteristiky je značena  $h(n)$ .

Díky impulzní charakteristice vlákna je možné určit konkrétní vzorek, u kterého došlo k odrazu impulzu od konce vlákna. Na grafu impulzní charakteristiky jednoho záznamu (Obr. 3.3) je vidět průběh impulzní charakteristiky vlákna. Je patrné, že k odrazu došlo v oblasti 2000. vzorku. Z této hodnoty je možno získat délku vlákna, která bude dále zobrazena v plovoucím průměru.

Na Obr. 3.3 je tedy zobrazen průběh jednoho záznamu impulzní charakteristiky, na Obr. 3.4 je zobrazen průběh více záznamů impulzní charakteristiky. Je zřejmé, že nedošlo k výrazným odchylkám, což znamená, že je systém téměř stabilní.



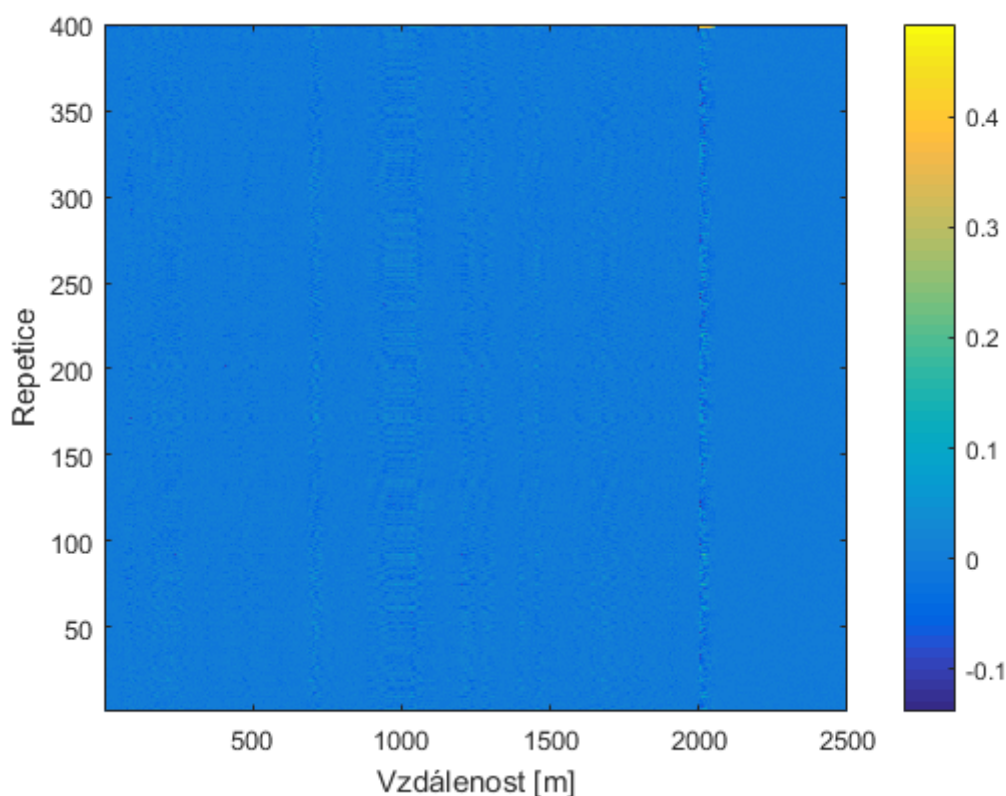
Obr. 3.3: Impulzní charakteristika jednoho záznamu.



Obr. 3.4: Impulzní charakteristika více záznamů.

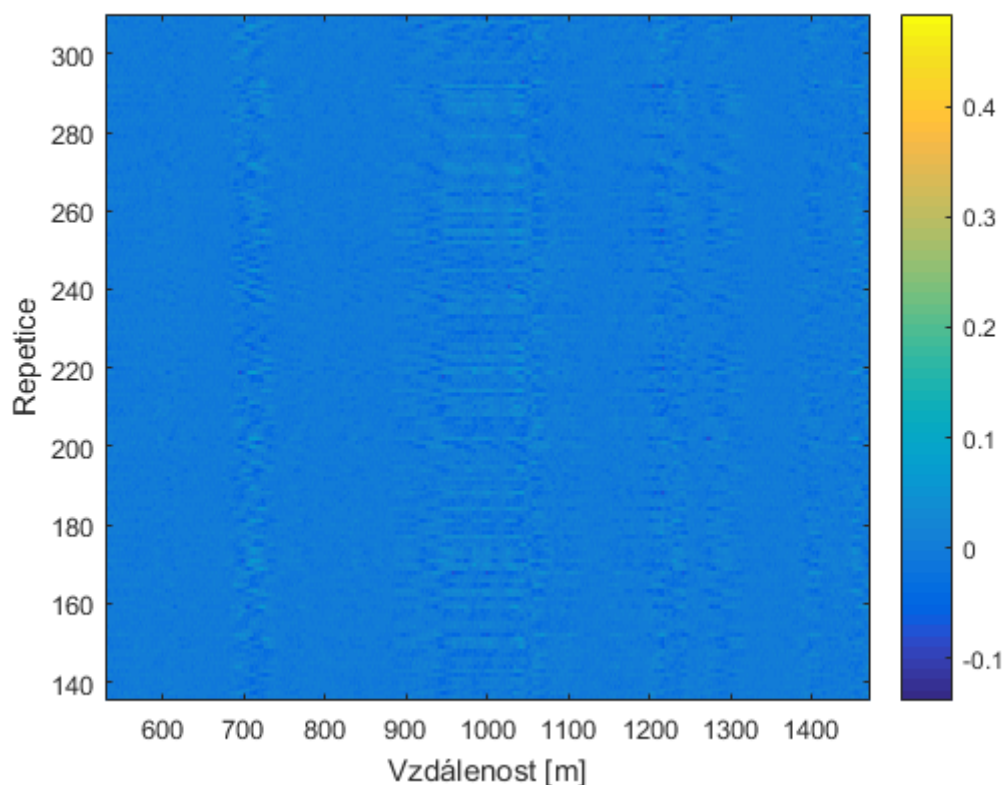
### 3.2.3 Plovoucí průměr

Následně byl použit plovoucí průměr, čímž došlo k potlačení náhodného šumu. Je to patrné z grafu signálu po filtraci plovoucím průměrem (Obr. 3.5), kde je lépe rozpoznatelná zajímavá oblast s relevantní informací. Opět je vidět odraz pulzu od konce vlákna na vzdálenosti 2 *km*, zajímavá oblast, kde byla zachycena aktivita, je v oblasti 1 *km*. Je zde zaznamenána i aktivita v oblasti 700 *m* a 1200 *m*, což bylo zřejmě způsobeno mechanickou vlastností optického vlákna. Tudíž mohou být tyto záznamy označeny jako falešná aktivita.



Obr. 3.5: Plovoucí průměr signálu.

Zobrazené záznamy aktivity na detailnějším grafu zajímavé oblasti (Obr. 3.6) umožňují lépe vidět rychlou změnu v oblasti jednoho kilometru. A také dvě pomalejší změny, které jak již bylo zmiňováno, jsou způsobeny zřejmě mechanickou vlastností optického vlákna.

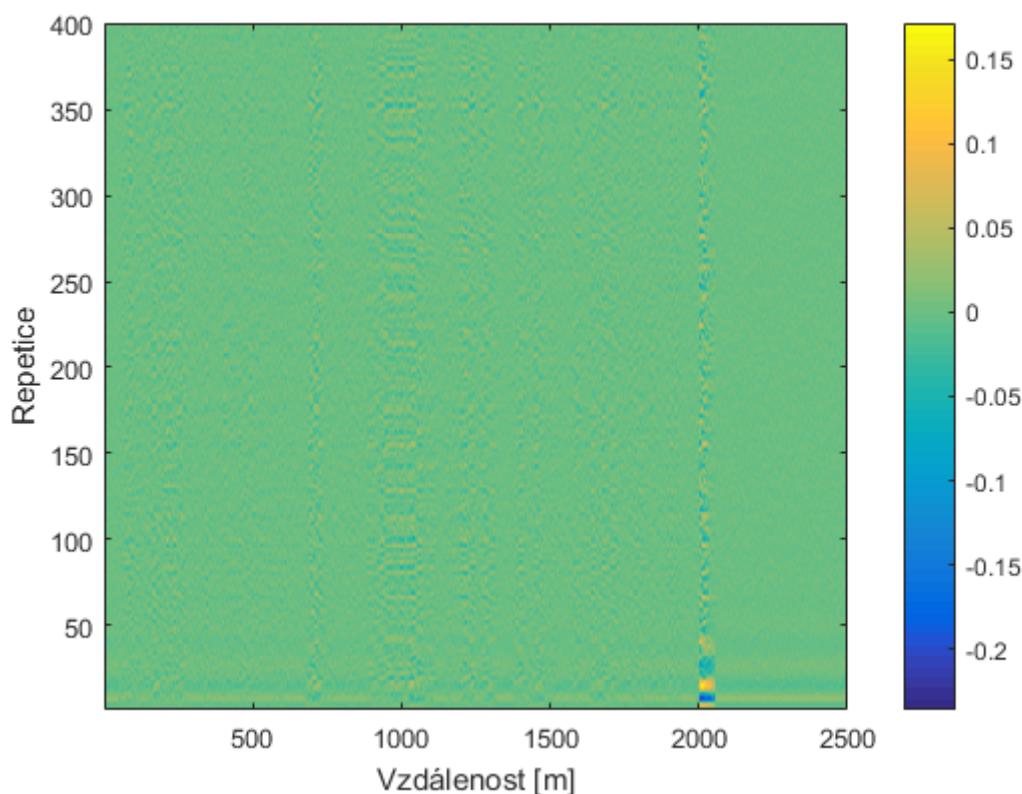


Obr. 3.6: Detail zajímavé oblasti.

### 3.2.4 Pásmová propust

Jako dalším vhodným filtrem byla zvolena pásmová propust. Tím bylo dosaženo odfiltrování nežádoucích kmitočtů. Použit byl filtr 5. řádu, který měl pro konkrétně tento daný signál nejčitelnější výsledek. Pro dolní mezní frekvenci byla dána hodnota  $80 \text{ Hz}$  a horní mezní frekvence byla  $430 \text{ Hz}$ , meze byly určeny na základě teoretických znalostí různých aktivit a postupné optimalizací.

Po použití pásmové propusti je z následujícího grafu (Obr. 3.7) viditelné, že bylo dosaženo podobného výsledku jako u plovoucího průměru. Nicméně odraz pulzu od konce vlákna je v grafu lépe čitelný a taktéž je lépe znázorněna zajímavá oblast v místě jednoho kilometru. Oproti předchozímu případu jsou ale zobrazeny falešné aktivity na více místech, což je nežádoucí.



Obr. 3.7: Zobrazení signálu po použití pásmové propusti.

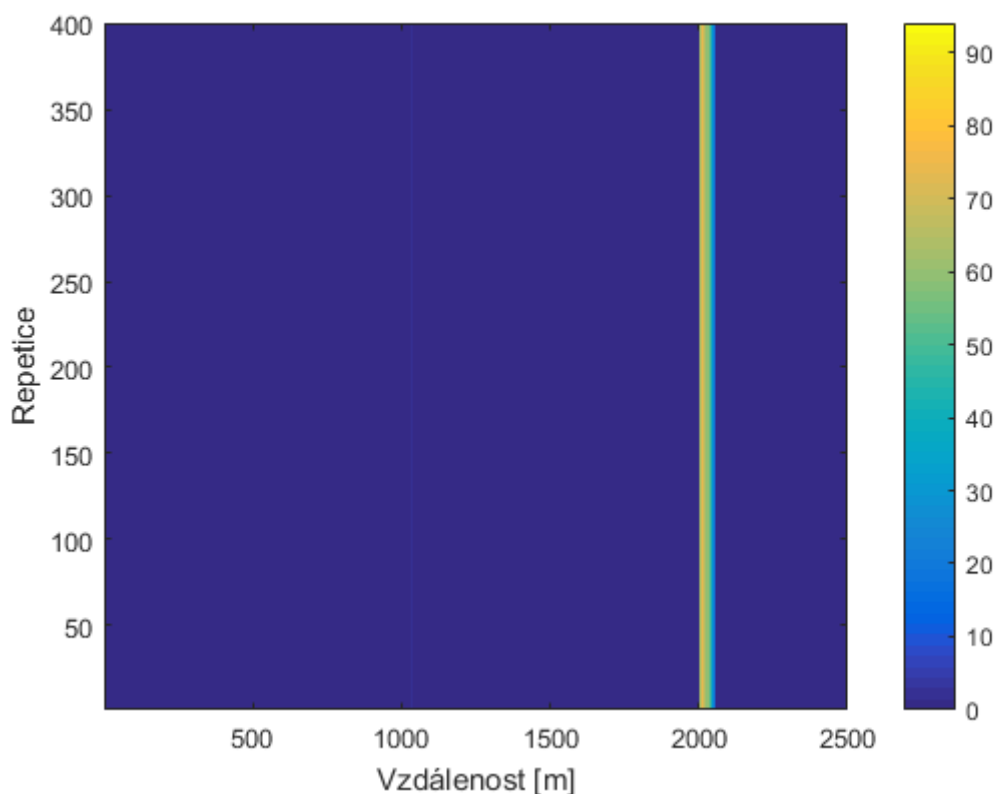
### 3.2.5 Korelace

Jako poslední byla použita autokorelace signálu, kdy byl proveden skalární součin jednotlivých složek signálu. Jak již název autokorelace napovídá, byl korelován signál se sebou samým, čímž byla určena nějaká soběpodobnost signálu, kterou byly určeny relevantní periodika. Tímto způsobem se podařilo odstranit vzniklý náhodný šum a získat požadované informace.

V grafu níže (Obr. 3.8) je již velmi dobře čitelný odraz impulzu od konce vlákna v místě 2 *km* a zejména v zajímavé oblasti na 1 *km* je zaznamenána samotná aktivita. Došlo k odstranění náhodného šumu i možných falešných aktivit, které byly viditelné v předešlých použitých metodách.

Tato metoda se jeví jako nejideálnější pro analýzu signálu z tohoto distribuovaného akustického systému. Výsledný graf byl nejlépe čitelný a byly odstraněny nežádoucí složky signálu, což se u předchozích dvou případů zcela nepodařilo.





Obr. 3.8: Zobrazení signálu po použití autokorelace.

### 3.3 Náměry - trasa Praha

Stejně tak jako u předchozí trasy byly analyzované signály naměřeny distribuovaným akustickým systémem (DAS). Aktivita byla snímána v prostředí podél celého optického vlákna. Samotný systém byl nainstalován na trase v Praze.

V tomto případě byl ovšem k detekci použit pouze jeden kanál a signál  $p$ . Na trase se bohužel pravděpodobně objevilo několik technických závad, které se projeví na kvalitě signálu a schopnosti detekovat záznamy aktivit. Tyto nedokonalosti byly způsobeny zřejmě optickými přepojkami na trase a vlastnostmi optického vlákna.

Zpracování a analýza signálu byli provedeny v programovém prostředí Matlab.

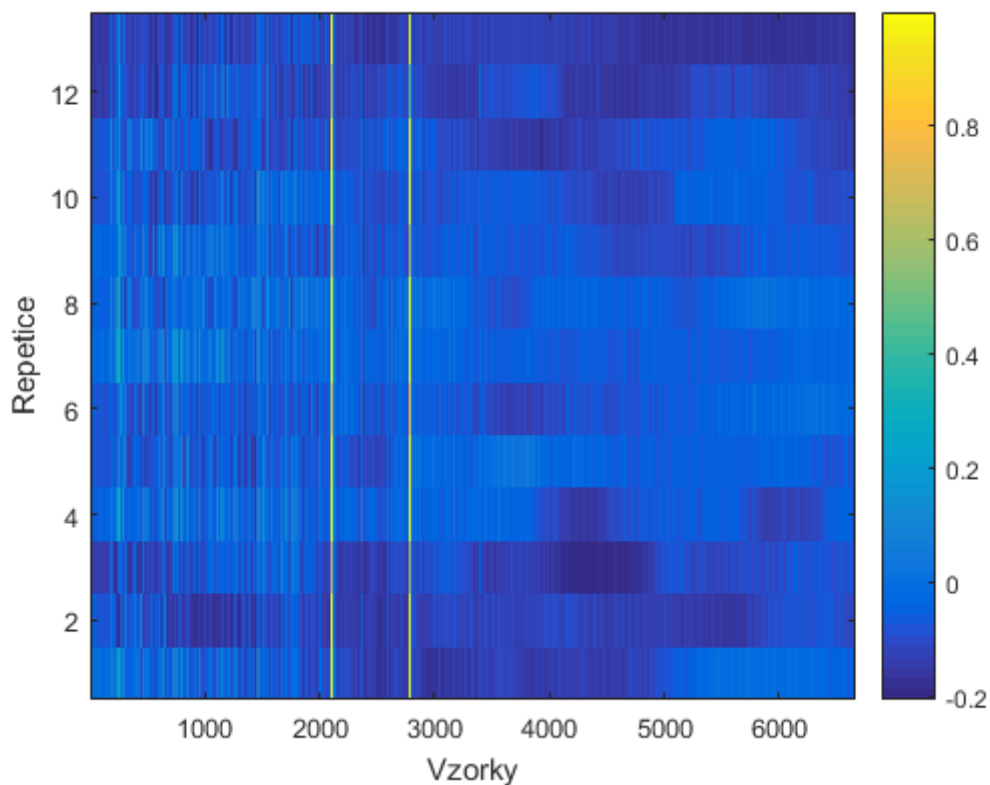
#### 3.3.1 Úprava původního signálu

Původní výstupní signál senzorického systému byl v binární podobě a bylo třeba jej převést do matice, aby bylo možno se signálem v programu Matlab dále pracovat.

Pomocí vysokých špiček byl průběh rozdělen na repetice neboli na jednotlivé periodické části. Díky rozdělení signálu bylo možno tento signál dále filtrovat a

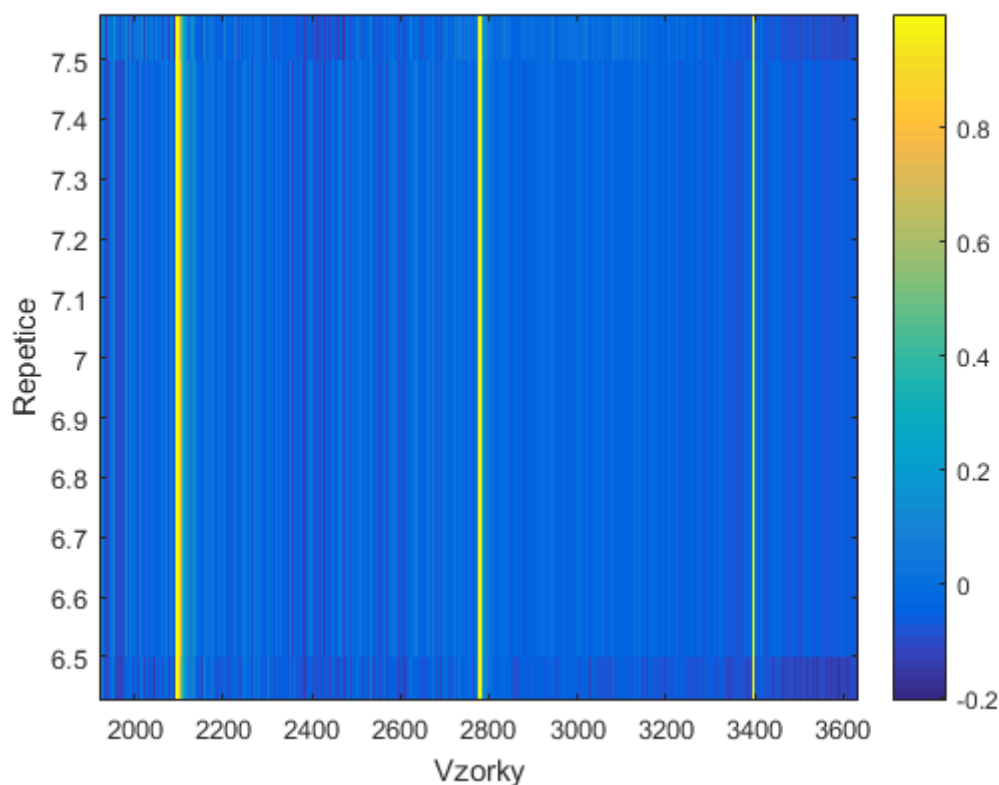
analyzovat.

Po úpravě signálu je na grafu (Obr. 3.9) vidět několik oblastí, které je třeba následně analyzovat. U záznamu aktivity v oblasti 2100. vzorku a 2750. vzorku není zcela jisté, zda se jedná o vlastnosti trasy, či došlo k pohybu v prostředí trasy.



Obr. 3.9: Zobrazení úpravy původního signálu.

Odraz impulzu od konce vlákna je dobře viditelný až po detailním zobrazení na grafu níže (Obr. 3.10).

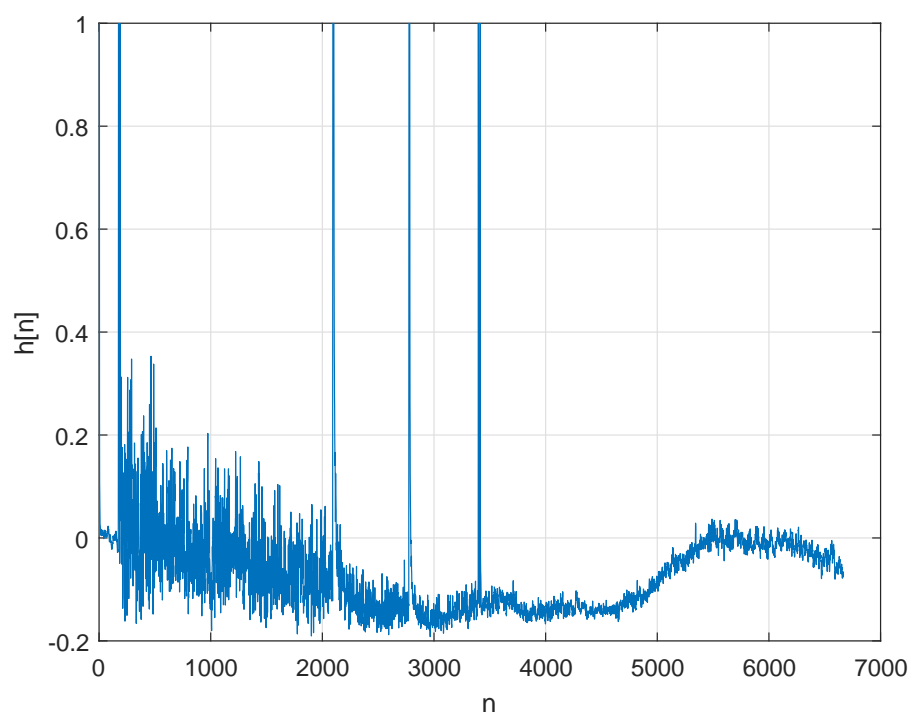


Obr. 3.10: Detail zobrazení úpravy původního signálu.

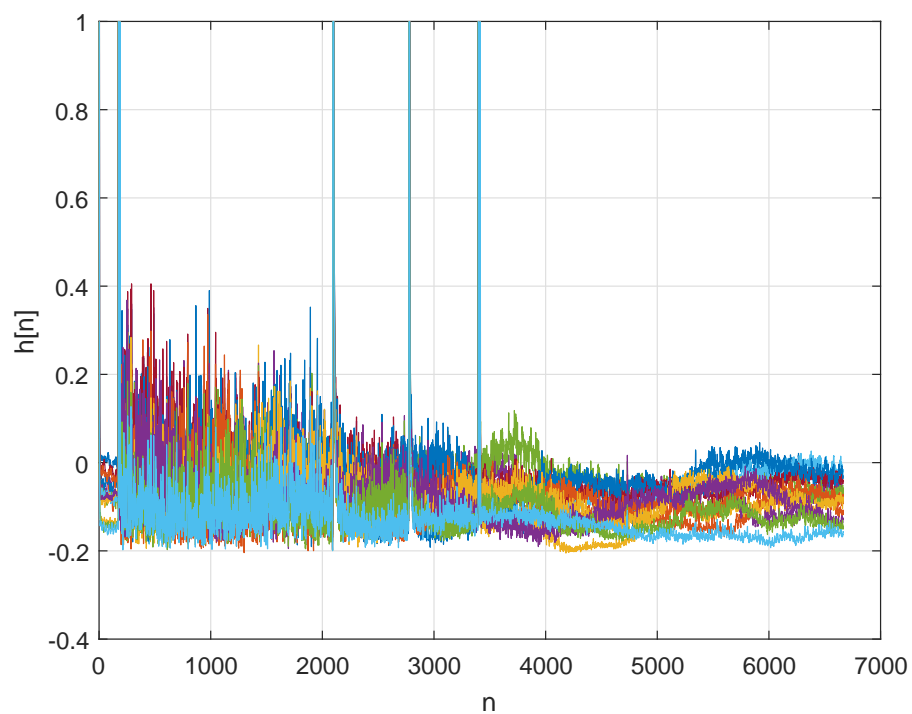
### 3.3.2 Impulzní charakteristika

Impulzní charakteristikou vlákna byl určen konkrétní vzorek, u kterého došlo k odrazu impulzu od konce vlákna. K odrazu impulzu došlo na 3400. vzorku, ovšem na grafu Impulzní charakteristiky (Obr. 3.11) je vidět více vysokých špiček. Ten v oblasti nuly je způsoben zřejmě optickou přípojkou systému, nebo došlo ke špatné synchronizaci. Špičky mezi odrazem a počátkem průběhu byly způsobeny pravděpodobně buď vlastnostmi optického vlákna, optických přepojek a nebo byla zaznamenána aktivita v prostředí kabelu.

Na grafu impulzní charakteristiky více záznamů (Obr. 3.12) jsou dobře čitelné jisté výkyvy, což znamená, že systém není zcela stabilní, jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly.



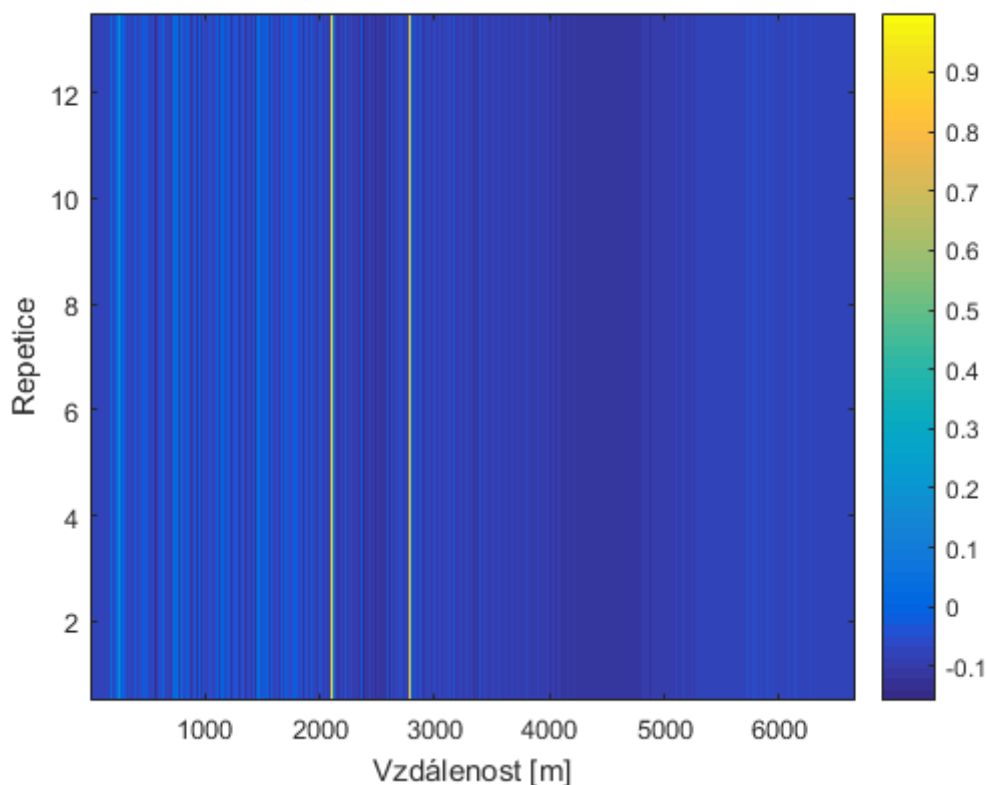
Obr. 3.11: Impulzní charakteristika jednoho záznamu.



Obr. 3.12: Impulzní charakteristika více záznamů.

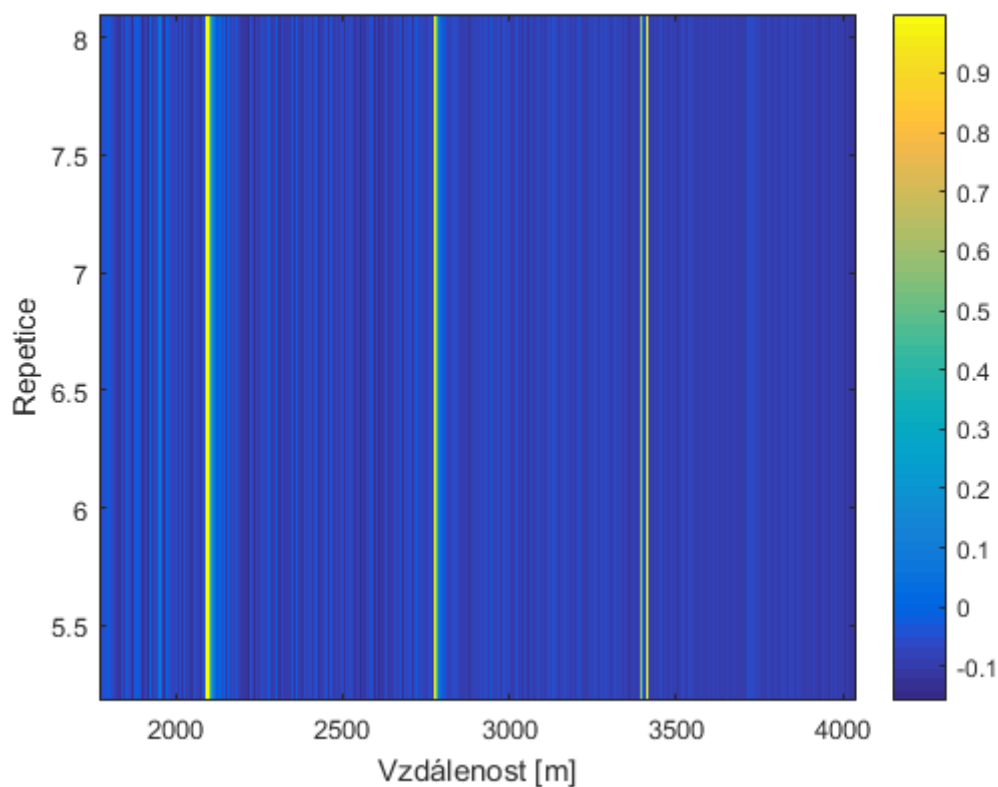
### 3.3.3 Plovoucí průměr

Použitím plovoucího průměru došlo ke zprůměrování hodnot a k potlačení vzniklého náhodného šumu. Což je patrné z grafu plovoucího průměru (Obr. 3.13), náhodný šum byl částečně odstraněn, ale zajímavé oblasti v místě 2100 *m* a 2750 *m* jsou stále, stejně tak jako oblast odrazu impulsu od konce vlákna v části 3400 *m*.



Obr. 3.13: Plovoucí průměr signálu.

Na detailnějším zobrazení plovoucího průměru signálu (Obr. 3.14) je vidět, že by se v případě první zajímavé oblasti (2100 *m*) mohlo jednat o záznam aktivity z prostředí a v druhém případě se pravděpodobně jedná o falešnou aktivitu, která jak již bylo zmiňováno může znamenat mechanickou nedokonalost trasy.

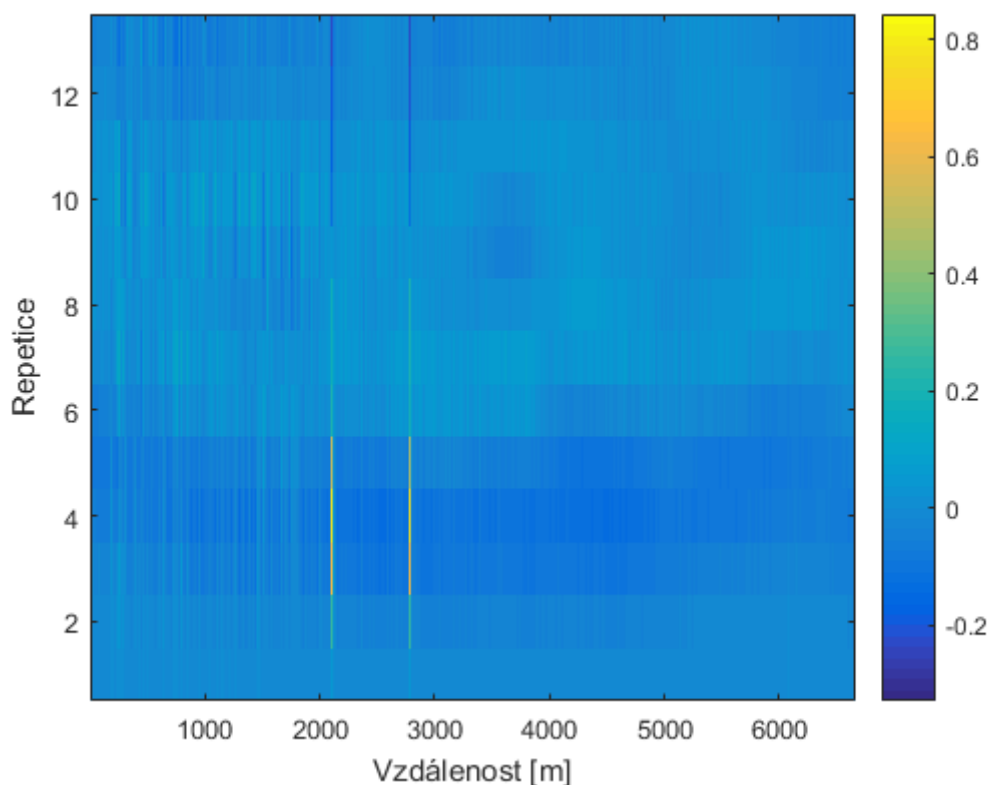


Obr. 3.14: Detail plovoucího průměru.

### 3.3.4 Pásmová propust

Stejně jako u předchozí trasy byla jako další metoda použita pásmová propust. Aplikován byl filtr 5. řádu, který byl pro filtraci tohoto signálu nejvhodnější. Dolní mez frekvence byla nastavena na  $20\text{ Hz}$  a horní mezní frekvence byla  $500\text{ Hz}$ .

Z následujícího grafu (Obr. 3.15) je značně patrné, že výsledek aplikace pásmové propusti je horší než v případě plovoucího průměru, což znamená, že nebylo dosaženo žádné nové relevantní informace a není tak možno přesně určit, co zajímavé oblasti prezentují.



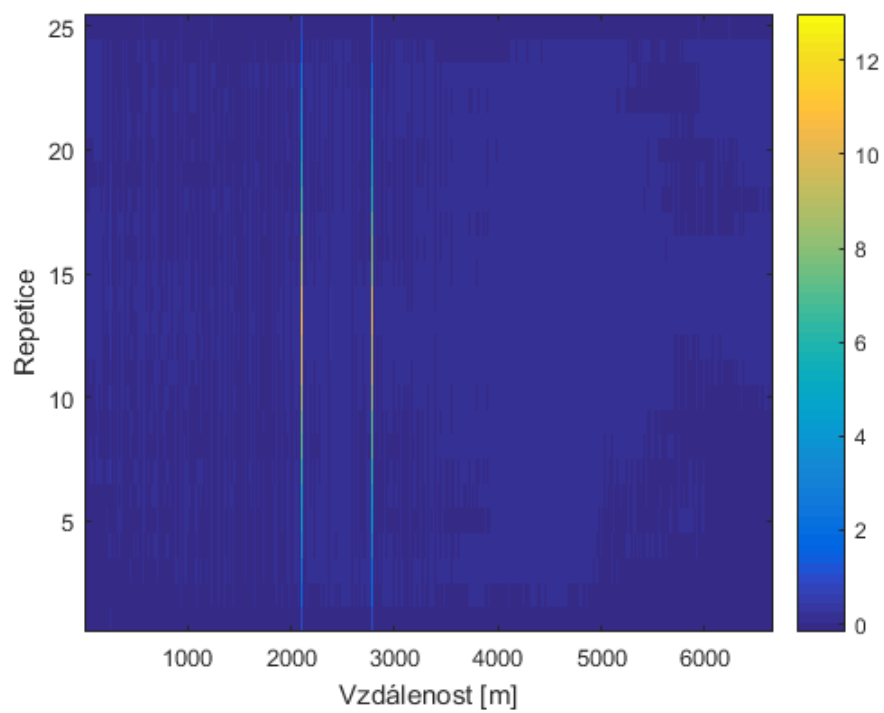
Obr. 3.15: Zobrazení signálu po použití pásmové propusti.

### 3.3.5 Korelace

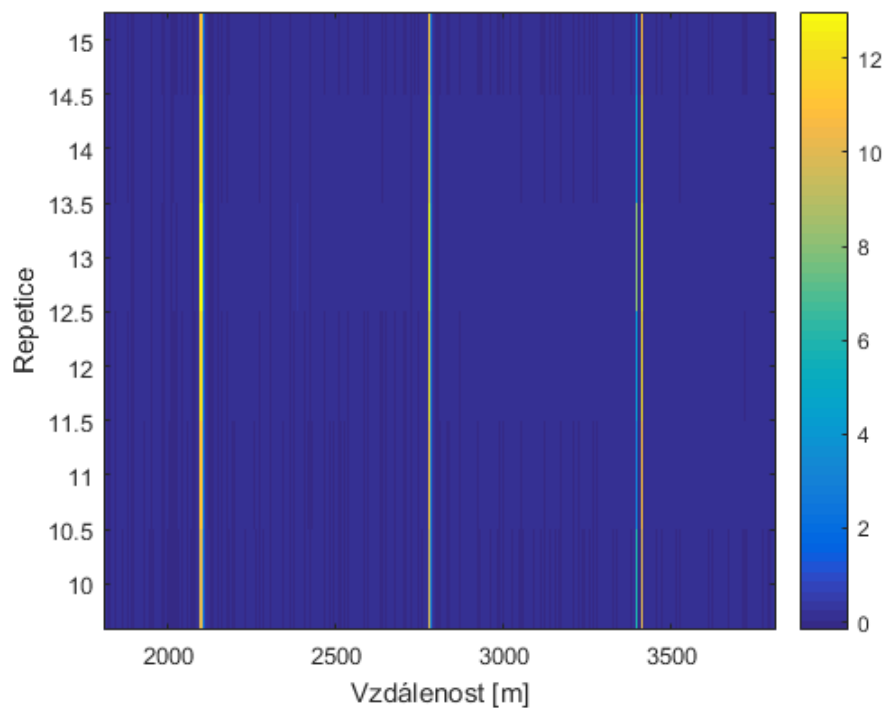
Jako poslední metoda byla použita autokorelace díky které, jak bylo zmiňováno výše, bylo možno provést skalární součin jednotlivých složek signálu se sebou samým.

Na výsledném grafu (Obr. 3.16) je vidět, že bylo dosaženo podobného výsledku jako u plovoucího průměru. Zejména z detailnějšího zobrazení (Obr. 3.17) lze jednoznačně vyčíst, že k odrazu impulzu došlo opět v oblasti 3400 *m*. Vlastnost signálu v oblasti 2100 *m* a 2750 *m* nebylo možno zcela přesně určit. Ovšem je jasné, že se nejedná o náhodný vzniklý šum.

Nicméně aby bylo možno detekovat aktivitu v prostředí s větší přesností a jistotou, bude zřejmě třeba upravit samotnou optickou trasu či lepší synchronizace generátoru.



Obr. 3.16: Zobrazení signálu po použití autokorelace.

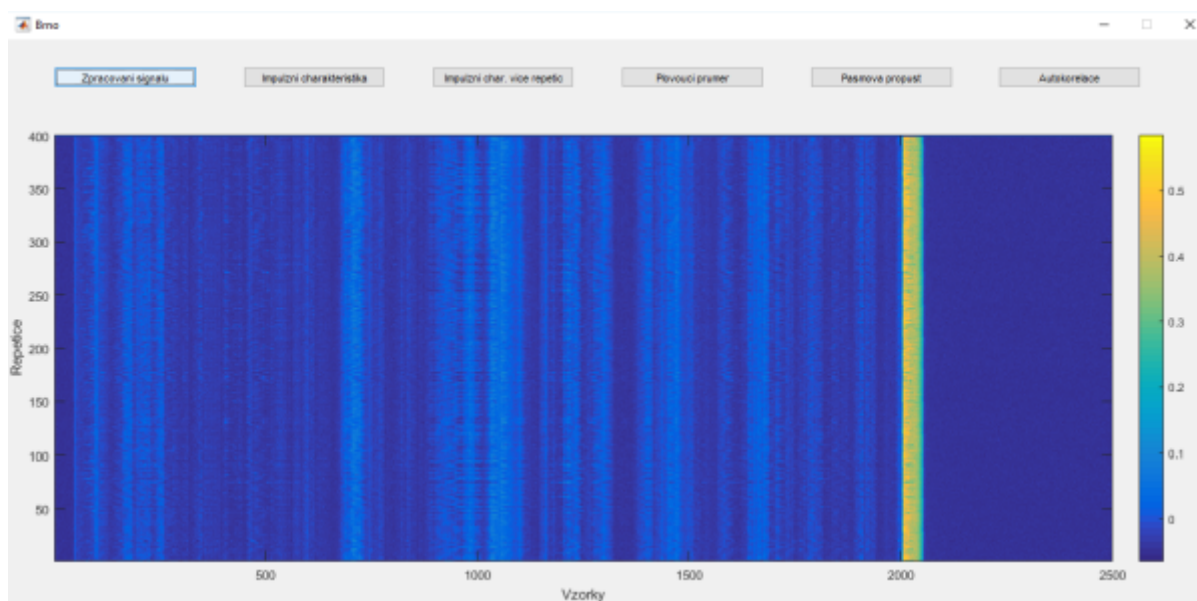


Obr. 3.17: Detail zobrazení signálu po použití autokorelace.



### 3.4 Grafické uživatelské rozhraní

Ze zpracovaných filtrů pro úpravu naměřeného signálu bylo vytvořeno grafické uživatelské rozhraní (GUI - Graphical user interface). Bylo uzpůsobeno jak pro trasu v Brně, tak i pro trasu v Praze a slouží ke snazšímu náhledu na jednotlivé grafy. V horní části GUI se nachází ovládací menu (viz Obr. 3.18) a ve spodní části prostor pro zobrazení grafů s popisem os apod. Uživatelské rozhraní je optimalizováno pro program Matlab verze 2016a.



Obr. 3.18: Grafické uživatelské rozhraní - Brno.

## 4 ZÁVĚR

V úvodu práce byly rozděleny senzorické systémy dle prostorového uspořádání a následně byly uvedeny konkrétní varianty senzorů. Poté byly popsány jednotlivé technologie užívané v daných senzorických systémech, také funkce senzorů samotných, jejich výhody a využití v praxi. Mezi ně patří například senzory FBG, SOFO, DVS, DAS apod. Dále byly určeny vhodné filtry aplikovatelné na signály měřících systémů. Zvoleny byly na základě teoretických znalostí. Vyhovujícím filtrem byl zvolen plovoucí průměr, díky kterému byly zprůměrovány hodnoty signálů, čímž byl částečně potlačen vzniklý šum. Dalším filtrem byla určena pásmová propust, pomocí které byly odstraněny nežádoucí kmitočty. Také byla popsána funkce korelace určující souvztažnost signálu v daném vzorku.

Dále byly prvně zpracovány a analyzovány signály z reálné trasy v Brně a následně signály z trasy v Praze.

V prvním případě byla určena v programovém prostředí Matlab impulzní charakteristika měřicího vlákna jednoho záznamu a následně byla porovnána s dalšími záznamy. Nedošlo k výrazné odchylce, tudíž je systém téměř zcela stabilní. Z impulzní charakteristiky byl určen vzorek na konci vlákna, u kterého došlo k odrazu pulzu, díky němuž bylo možno vypočítat délku vlákna. Následně byl aplikován plovoucí průměr. Z grafu byl patrný odraz na konci vlákna, poloha záznamu aktivity v okolí a také falešné aktivity. Nadále byl použit filtr pásmové propusti, u kterého byl vyhodnocen téměř totožný výsledek jako u plovoucího průměru, ale v grafu bylo čitelných více falešných aktivit. Nejlépe dopadla autokorelace, u které byly jasně viditelné výsledné hodnoty. Odraz pulzu od konce vlákna byl zaznamenán na 2000 *m* a detekce aktivity v prostředí vlákna byla zaznamenána v oblasti 1000 *m*.

Následně byly zpracovány signály z trasy v Praze. Tato trasa měla více technických nedostatků, které se projeví v samotných náměrech signálu. Což bylo i dobře viditelné při porovnání impulzní charakteristiky pro více záznamů. V tomto případě byly použity filtry: plovoucí průměr, pásmová propust a také korelace. U všech těchto variant byly zaznamenány téměř totožné výsledky. Ze získaných grafů byl určen odraz pulzu od konce vlákna v oblasti 3400 *m* a dvě zajímavé oblasti, u kterých nebylo možno určit s dostatečnou přesností jejich vlastnosti. U této trasy bude zřejmě třeba technických úprav.

V samotném závěru bylo vypracováno grafické uživatelské rozhraní (GUI) pro obě trasy. Uživatelské rozhraní slouží k zobrazení signálu po použití jednotlivých filtrů.

# LITERATURA

- [1] REN, Meiqi. *Distributed Optical Fiber Vibration Sensor Based on Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometry*. Ottawa, Kanada, 2016.
- [2] DUŠEK, Martin a Michal MAZANEC. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. Říčany, 2012.
- [3] OMEGA Engineering, Inc. *Fiber-Optic Temperature Measurement [online]*. Dostupné z URL:  
<<https://www.omega.com/prodinfo/fiber-optic-temperature-measurement.html>>.
- [4] FBGS. *FIBER BRAGG GRATING (FBG) SENSOR PRINCIPLE [online]*. Dostupné z URL:  
<<http://www.fbgs.com/technology/fbg-principle/>>.
- [5] INFIBRA TECHNOLOGIES. *DTS Overview [online]*. Dostupné z URL:  
<<http://www.infibratechnologies.com/technologies/distributed-temperature-sensor.html>>.
- [6] INAUDI, Daniele. *SOFO Sensors for Static and Dynamic Measurements*. Švýcarsko, 2004.
- [7] SMARTEC. *SOFO Standard Deformation Sensor [online]*. Dostupné z URL:  
<<https://smartec.ch/en/product/sofo-standard-deformation-sensor/>>.
- [8] KIPKOSGEI SANG, Alexander. *Distributed Vibration Sensing using Rayleigh Backscatter in Optical Fibers*. Blacksburg, Virginia, 2011.
- [9] CONWAY, Chris a Michael MONDANOS. *An introduction to fibre optic Intelligent Distributed Acoustic Sensing (iDAS) technology for power industry applications*. Londýn, 2015.
- [10] PARKER, Tom, Sergey SHATALIN a Mahmoud FARHADIROUSHAN. *Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications*. 2014. Dostupné z URL:  
<[www.firstbreak.org](http://www.firstbreak.org)>.
- [11] HILL, David. *Laser Focus World: Fiber Sensing: Optical fiber monitors the arterial networks of commerce [online]*. 2015. Dostupné z URL:  
<<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-51/issue-08/features/fiber-sensing-optical-fiber-monitors-the-arterial-networks.html>>.

- [12] ZAHIR M. HUSSAIN, AMIN Z. SADIK a Peter O'SHEA. *Digital signal processing: an introduction with MATLAB and applications*. Springer, 2011. ISBN 9783642155901.
- [13] SMITH, Steven W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Pub. 1997. ISBN 978-0966017632.
- [14] YU, Xuhui, Deliang ZHOU, Bin LU, Sufang LIU a Ming PAN. *Phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed fence-perimeter intrusion detection*. China, 2015.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| DAS  | Distribuované akustické snímání |
| DSP  | Digital Signal Processing       |
| DTS  | Distribuované teplotní senzory  |
| DVS  | Distribuované snímače vibrací   |
| FBG  | Fiber Bragg Grating             |
| FFT  | Rychlá Fourierova transformace  |
| OTDR | Optical time domain reectometry |
| SHM  | Structural Health Monitoring    |
| VVN  | Velmi vysoké napětí             |